



**HAL**  
open science

# Usinage de moules en matériaux composites, expression des contraintes liées au procédé

Grégory Chardon

► **To cite this version:**

Grégory Chardon. Usinage de moules en matériaux composites, expression des contraintes liées au procédé. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2011. Français. NNT : 2011CLF22147 . tel-00678330

**HAL Id: tel-00678330**

**<https://theses.hal.science/tel-00678330v1>**

Submitted on 12 Mar 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

n° ordre : 2147  
EDSPIC : 529

Université BLAISE PASCAL – Clermont II  
Ecole Doctorale  
Sciences pour l'Ingénieur de Clermont Ferrand

## Thèse de Doctorat

Présentée  
pour obtenir le grade de :

Docteur d'université

Spécialité : Génie Mécanique

par

Grégory CHARDON

### **Usinage de moules en matériaux composites, expression des contraintes liées au procédé.**

Soutenue publiquement le 07 juillet 2011 devant le jury :

M. Henri PARIS	Professeur Univ, Univ Joseph Fourier, Grenoble	Rapporteur
M. Gérard POULACHON	Professeur Univ, Arts et Métiers Paristech, Cluny	Rapporteur
M. Jean-Yves HASCOËT	Professeur Univ, Ecole Centrale, Nantes	Examineur
Mme Hélène CHANAL	Maître de Conf, IFMA, Clermont-Ferrand	Co-encadrante de thèse
M. Emmanuel DUC	Professeur Univ, IFMA, Clermont-Ferrand	Directeur de thèse
M. Thierry GARNIER	Asahi Diamond Industrial Europe	Invité
M. Claude DAUPHIN	Hexcel Composites	Invité

Laboratoire de Mécanique et Ingénieries  
Institut Français de Mécanique Avancée et Université Blaise Pascal







## Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au LaMI (Laboratoire de Mécanique et Ingénieries) de l'Institut Français de Mécanique Avancée et de l'Université Blaise Pascal.

Je remercie Monsieur le Professeur Jean-Yves Hascoët pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury ainsi que Messieurs les Professeurs Henri Paris et Gérard Poulachon pour la rédaction des rapports.

Je remercie l'ensemble des membres du projet LCM-Smart avec qui ce fut un plaisir de travailler avec une pensée particulière pour Monsieur le Professeur Alain Vautrin qui malheureusement nous a quitté trop tôt.

Je tiens à remercier les différents partenaires industriels et publics qui m'ont apporté leur aide et leurs conseils durant cette thèse. Je pense notamment à Mehdi Chérif, Maître de Conférence à l'Université Bordeaux 1 pour les images au profilomètre, à Mohamed Hammadi de Sandvik Coromant et à Thierry Garnier d'Asahi Diamond pour sa participation au jury.

Je remercie également l'ensemble des personnels chercheurs, enseignants, techniques et administratifs du LaMI et de l'IFMA qui m'ont permis de mener à bien cette thèse mais aussi le monitorat et des actions de transfert de technologie. Je remercie tout particulièrement Nicolas Blanchard pour l'aide apportée lors de la réalisation du démonstrateur de laboratoire.

Je remercie mes encadrants Madame Hélène Chanal, Maître de Conférence et Monsieur le Professeur Emmanuel Duc pour leurs conseils et les nombreuses relectures. Je tiens à souligner leur bienveillance qui m'a permis de travailler dans les meilleures conditions et de préparer au mieux ma nouvelle situation professionnelle.

J'adresse un grand merci à mes co-bureaux et à l'ensemble des collègues doctorants, pour les cafés et repas partagés dans la bonne humeur, qui m'ont permis de garder le moral même dans les périodes difficiles. Je ne me lancerai pas dans l'établissement d'une liste exhaustive mais je salue ceux qui ont rejoints d'autres horizons et j'encourage ceux qui ont encore la tête dans le guidon. De plus, je souhaite le meilleur à mon binôme, Sylvain, qui m'a épaulé durant ces sept dernières années.

Je remercie chaleureusement mes parents, ma famille et mes amis Cellois et Cachanais pour leur soutien. Enfin, j'embrasse et je dédie cette thèse à ma jeune épouse, Amandine, qui n'a pas hésité à m'accompagner dans cette épreuve et à continuer le chemin à mes côtés.



# Table des matières

REMERCIEMENTS .....	3
TABLE DES MATIERES .....	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS .....	7
INDEX DES TABLEAUX.....	9
PRINCIPALES NOTATIONS .....	11
INTRODUCTION.....	13
<b>CHAPITRE 1 PROBLEMATIQUE DE LA FABRICATION DE PIECES EN RTM .....</b>	<b>15</b>
1. UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES DANS L' AERONAUTIQUE.....	15
2. PROCEDES DE FABRICATION.....	16
2.1. Usinage de pièces en aluminium .....	16
2.2. Les procédés de mise en forme des composites .....	17
2.2.1. Procédés d'obtention sans injection de résine.....	17
2.2.2. Procédés d'obtention par injection de résine.....	21
2.3. Le procédé RTM et les outillages associés.....	23
3. PROBLEMATIQUE DE LA FABRICATION DE MOULE EN HEXTOOL™ .....	25
3.1. Description et intérêts de l'Hextool™.....	25
3.2. Méthode de fabrication de moules.....	28
3.3. Problématique industrielle de l'usinage de moule en composite.....	31
3.4. Problématique scientifique .....	32
<b>CHAPITRE 2 FINITION AVEC OUTIL COUPANT .....</b>	<b>35</b>
1. ETAT DE L' ART SUR L' USINAGE DE COMPOSITES .....	36
1.1. Caractéristiques des matériaux composites .....	36
1.1.1. Les matrices .....	36
1.1.2. Les renforts.....	38
1.1.3. Les composites.....	40
1.2. Usinage des matériaux composites.....	41
1.2.1. Modèles de coupe des matériaux composites.....	41
1.2.2. Propriétés physiques particulières et impact sur l'usinabilité .....	43
1.2.3. Perçage des composites.....	45
1.2.4. Fraisage-détourage des composites.....	46
1.2.5. Procédés alternatifs à l'usinage .....	47
1.2.6. Cas de l'usinage de forme .....	49
2. MOTIF LAISSE PAR L' OUTIL SUR LA PIECE USINEE .....	50
2.1. Calcul de la rugosité arithmétique théorique .....	50
2.2. Etablissement d'un essai de référence dans l'aluminium .....	52
2.2.1. Trajectoires d'usinage et conditions de coupe .....	53
2.2.2. Matériel et paramètres de mesure de rugosité .....	54
2.2.3. Résultats et commentaires.....	54
3. MISE EN EVIDENCE D'UN SEUIL DE RUGOSITE POUR L' HEXTOOL™ .....	56
3.1. Trajectoires d'usinage et conditions de coupe.....	56
3.2. Analyse des résultats .....	58
4. CONCLUSION .....	62

<b>CHAPITRE 3</b>	<b>FINITION AVEC OUTIL ABRASIF .....</b>	<b>65</b>
1.	ETAT DE L'ART SUR LES PROCEDES ABRASIFS.....	66
1.1.	Les principes de mise en œuvre.....	66
1.2.	Inventaire et choix d'une solution abrasive pour la finition .....	68
1.2.1.	Polissage sur machine à commande numérique .....	68
1.2.2.	Le meulage .....	69
1.2.3.	Bilan .....	70
2.	FINITION PAR OUTIL ABRASIF .....	71
2.1.	Définition de l'outil meule .....	71
2.2.	Protocole expérimental .....	73
2.3.	Faisabilité d'une opération de meulage sur un centre d'usinage .....	74
2.4.	Capacité à tolérer des variations de prise de passe axiale $a_p$ .....	76
2.5.	Productivité de l'outil meule .....	78
2.6.	Analyse de la rugosité obtenue .....	79
2.7.	Usure de l'outil meule .....	81
2.7.1.	Choix d'une granulométrie adaptée .....	81
2.7.2.	Essais d'usure pour une granulométrie de 40 $\mu\text{m}$ .....	83
3.	CONCLUSION .....	86
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>GAMME D'USINAGE D'UN MOULE EN HEXTOOL™ .....</b>	<b>87</b>
1.	TYPOLOGIE DES PIECES USINEES .....	88
2.	PROBLEMATIQUE DE L'USINAGE DE MOULE EN HEXTOOL™ .....	91
3.	CHOIX D'OUTILS ADAPTES A LA SEMI-FINITION .....	93
3.1.	Essais de puissance consommée.....	93
3.2.	Aptitude des outils PCD à l'usinage de moule en Hextool™.....	96
3.3.	Aptitude des outils en carbure de tungstène .....	97
3.3.1.	Aptitude aux opérations de semi-finition .....	97
3.3.2.	Aptitude aux opérations de finition .....	99
3.3.3.	Usure des outils .....	100
3.4.	Bilan sur le choix des outils.....	101
4.	CHOIX DES STRATEGIES D'USINAGE.....	102
4.1.	Stratégies de semi-finition .....	102
4.2.	Stratégie d'usinage sur le flanc de l'outil .....	103
4.2.1.	Axe outil dans le plan de dépose .....	104
4.2.2.	Axe outil orthogonal au plan de dépose .....	105
5.	CHOIX DE LA MACHINE OUTIL ADAPTEE .....	107
5.1.	Architecture de la machine .....	107
5.1.1.	Architecture 3 axes.....	107
5.1.2.	Architecture 5 axes.....	108
5.1.3.	Bilan sur l'architecture machine.....	111
5.2.	Equipements spécifiques .....	112
6.	APPLICATION DANS LE CADRE DU PROJET LCM-SMART .....	113
6.1.	Gamme 1 avec polissage manuel.....	114
6.2.	Gamme 2 avec meulage.....	115
7.	CONCLUSION .....	116
	CONCLUSION .....	119
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	125
	ANNEXE.....	135

## Table des illustrations

Figure 1-1: fraiseuse 5 axes UGV à table verticale Aérostar Forest-Liné.....	17
Figure 1-2: installation d'enroulement filamentaire [Reyne98].....	18
Figure 1-3: principe de pultrusion [Reyne98].....	18
Figure 1-4: machine de drapage Atlas Forest-Liné [Debout10].....	19
Figure 1-5: procédé de placement de fibre.....	20
Figure 1-6: (a) procédé SMC ; (b) procédé BMC [Reyne98].....	20
Figure 1-7: schéma de principe du procédé LCM [Binetruy06].....	21
Figure 1-8: utilisation d'un outillage RTM-Light avec une bache à vide (société PCM).....	23
Figure 1-9: plancher composite moulé par technologie RTM [Binetruy06].....	23
Figure 1-10: moule RTM utilisable en étuve (société PCM).....	24
Figure 1-11: Hextool™ sous forme de préimprégnés et usiné.....	26
Figure 1-12: mandrin de drapage réalisé en Hextool™ et en Invar®.....	27
Figure 1-13: moule en Hextool™ pour RTM-Light (société NovaTech).....	27
Figure 1-14: (a) moule en coque ; (b) coupe d'un moule avec une âme en mousse.....	28
Figure 1-15: réparation d'un moule en Hextool™.....	29
Figure 1-16: phénomène d'ondulation sur le côté libre de la matière du à l'empilement.....	30
Figure 1-17: épaisseur moyenne de matière à retirer lors de l'usinage d'un moule.....	30
Figure 2-1: typologie de base des renforcements.....	38
Figure 2-2: composite sandwich avec une âme en nid d'abeilles.....	40
Figure 2-3: les quatre mécanismes de coupe [Teti02].....	41
Figure 2-4: formation du copeau lors de la coupe orthogonal [Arola97].....	42
Figure 2-5: modèle éléments finis intégrant les fibres et la matrice [Rao07a].....	43
Figure 2-6: coefficient de délaminage [Yanming02].....	44
Figure 2-7: empilement de couches d'orientations différentes.....	45
Figure 2-8: outils spécifiques pour le perçage des matériaux composites.....	46
Figure 2-9: outils spécifiques pour le fraisage-détourage des matériaux composites.....	47
Figure 2-10: mécanisme de délaminage lors de la découpe jet d'eau [Shanmugan08].....	48
Figure 2-11: outils PCD pour le fraisage de forme de matériaux composites.....	49
Figure 2-12: (a) motif mesuré sur une surface usinée en aluminium [Quinsat08] ; (b) motif laissé sur une surface concave par une fraise hémisphérique [Lin96].....	50
Figure 2-13: hauteur de crête théorique [Tournier01], [Tournier05].....	51
Figure 2-14: erreur de modélisation de la rugosité théorique.....	52
Figure 2-15: (a) fraise hémisphérique ; (b) géométrie et trajectoire d'usinage ; (c) pièce usinée.....	53
Figure 2-16: rugosimètre Mitutoyo SurfTest SV500.....	54
Figure 2-17: comparaison entre rugosités théoriques et expérimentales pour un angle de dépinçage de 5° dans l'aluminium.....	55
Figure 2-18: trajectoires d'usinage, outils, et pièce usinée.....	56
Figure 2-19: comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise boule PCD, angle de dépinçage de 5°) dans l'Hextool™.....	58
Figure 2-20: comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise boule PCD, angle de dépinçage de 10°) dans l'Hextool™.....	59
Figure 2-21: Comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise torique PCD, angle de dépinçage de 15°) dans l'Hextool™.....	59
Figure 2-22: empreinte cylindrique usinée avec une fraise torique en PCD, $a_p = 0,1$ mm et $\theta_t = 15^\circ$ ..	60
Figure 2-23: images des surfaces usinées dans l'Hextool™ avec un outil hémisphérique de $\phi$ 10 mm prises au profilomètre (a et b) et au MEB (c et d).....	61

Figure 2-24: section de copeau suivant la géométrie de l'outil .....	62
Figure 3-1: procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs [Felder09].....	67
Figure 3-2: outil de polissage à souplesse contrôlée et zone de contact entre l'outil et la pièce [Pessoles09].....	67
Figure 3-3: trajectoires de polissage [Pessoles09].....	68
Figure 3-4: Grinding Center Helitronic de marque Walter .....	69
Figure 3-5: mécanismes d'enlèvement de matière en meulage suivant l'orientation des fibres [Hu04]	70
Figure 3-6: outil meule avec têtes abrasives interchangeables.....	71
Figure 3-7: grains abrasifs de taille et de géométrie variable [Demirci10] .....	72
Figure 3-8: (a) 4 zones usinées lors des premiers essais de faisabilité ; (b) protocole expérimental ...	74
Figure 3-9: mesures de rugosité dans la direction transversale.....	75
Figure 3-10: Géométries et trajectoires d'usinage présentant des variations de prise de passe axiale ..	76
Figure 3-11: (a) pièce après finition à l'outil meule ; (b) géométrie avant finition.....	77
Figure 3-12: Evolution de la rugosité arithmétique moyenne en fonction de la vitesse d'avance .....	78
Figure 3-13: effort de meulage en fonction de la vitesse d'avance.....	79
Figure 3-14: images MEB d'une surface usinée avec l'outil meule (granulométrie 25 µm) .....	80
Figure 3-15: rugosité arithmétique moyenne en fonction de la granulométrie et de la vitesse d'avance .....	82
Figure 3-16: surface usinée avec l'outil meule de granulométrie 40 µm mesurée au profilomètre 3D ..	82
Figure 3-17: rugosité obtenue en fonction de la distance parcourue par l'outil .....	83
Figure 3-18: usure de l'outil observée au banc de prééplage .....	84
Figure 3-19: mesure du défaut de forme directement sur le centre d'usinage .....	85
Figure 4-1: triptyque de l'usinage de moules en matériaux composites .....	88
Figure 4-2: poutre en A (démonstrateur industriel SKF Aerospace).....	89
Figure 4-3: poutre en U (démonstrateur industriel d'Issoire Aviation) .....	89
Figure 4-4: analyse locale de la géométrie des moules .....	90
Figure 4-5: géométries particulières d'un outillage en Hextool™ .....	91
Figure 4-6: proportion des coûts de fabrication pour un moule métallique [Lee06].....	91
Figure 4-7: préforme du moule en Hextool™ .....	92
Figure 4-8: phénomène d'ondulation sur le côté libre de la matière du à l'empilement.....	93
Figure 4-9: essais de puissance sur Huron KX15 avec dispositif d'aspiration .....	94
Figure 4-10: outils utilisés pour les relevés de puissance.....	94
Figure 4-11: plaquette Sandvik R590 à insert PCD ( $a_{pmax} = 5$ mm).....	97
Figure 4-12: (a) pièce en cours d'ébauche ; (b) pièce après l'opération de finition.....	98
Figure 4-13: pièce usinée avec un outil en carbure après l'ébauche et après la finition .....	98
Figure 4-14: pièce usinée avec une fraise hémisphérique en carbure de tungstène (a) et en PCD (b) ..	99
Figure 4-15: perte d'acuité d'arête et usure constatée sur les outils en carbure de tungstène .....	100
Figure 4-16: effet escalier lors d'un usinage par niveau de Z.....	102
Figure 4-17: pièce test avec l'axe outil dans le plan de dépose .....	104
Figure 4-18: phénomène de délaminage lors de l'usinage sur le flanc de l'outil.....	105
Figure 4-19: pièces obtenues en usinage sur le flanc avec l'axe de l'outil orthogonal au plan de dépose .....	106
Figure 4-20: différentes trajectoires d'usinage par balayage [Feng02].....	106
Figure 4-21: zone de contact outil / matière dans le cas du balayage 3 axes avec une fraise hémisphérique [Baptista00].....	108
Figure 4-22 : usinage 5 axes avec un outil hémisphérique [Baptista00].....	109
Figure 4-23: collision et interférence en usinage 5 axes [Jun03] .....	110
Figure 4-24: (a) aspiration fixée à la table de la machine ; (b) cloche d'aspiration fixée à la broche ..	112
Figure 4-25: typologie du moule pour la poutre en A .....	113
Figure 4-26: simulation des différentes zones usinées .....	114
Figure 4-27: trajets d'usinage .....	115
Figure 4-28: zones à polir manuellement .....	116

## Index des tableaux

Tableau 1-1: variantes des procédés LCM .....	22
Tableau 1-2: propriétés de l'Hextool™ à l'état cuit .....	26
Tableau 2-1: critères essentiels des matrices TP et TD [Reyne98] .....	37
Tableau 2-2: matrices les plus utilisées pour les matériaux composites [Reyne98] .....	38
Tableau 2-3: types de renforcements [Reyne98] .....	39
Tableau 2-4: rugosité arithmétique et hauteur de crête théoriques .....	53
Tableau 2-5: conditions de coupe de finition pour la fraise hémisphérique .....	53
Tableau 2-6: conditions de coupe en finition .....	57
Tableau 3-1: paramètres de coupe de meulage .....	74
Tableau 3-2: paramètres de meulage .....	83
Tableau 4-1: conditions de coupe et puissances consommées .....	95
Tableau 4-2: paramètres d'usinage sur le flanc de l'outil .....	104
Tableau 4-3: conditions de coupe pour la gamme 1 .....	114
Tableau 4-4: conditions de coupe pour la gamme 2 .....	115



## Principales notations

BMC (Buck Molding Compound) :  
mise en œuvre à la presse de thermoplastique renforcé de fibres courtes  
CFRP : carbon fiber reinforced plastic  
GFRP : glass fiber reinforced plastic  
LCM : Liquid Composite Molding  
MEB : Microscope Electronique à Balayage  
PCD : diamant polycristallin  
RTM : Resin Transfer Molding  
SMC (Sheet Molding Compound) :  
mise en œuvre à la presse de préimprégnés à base de résine thermoplastique  
TD : résine thermodurcissable  
TP : résine thermoplastique  
 $a_e$  : prise de passe radiale en mm  
 $a_p$  : prise de passe axiale en mm  
D : diamètre de l'outil en mm  
 $f_z$  : avance à la dent en mm/tr/dent  
 $h_c$  : hauteur de crête en  $\mu\text{m}$   
 $K_c$  : pression spécifique de coupe en  $\text{N}/\text{mm}^2$   
N : vitesse de rotation de broche en tr/min  
p : intervalle entre passes en mm  
 $R_a$  : rugosité arithmétique en  $\mu\text{m}$   
 $R_s$  : rayon de courbure locale de la surface à usiner en mm  
r : rayon de coin de l'outil en mm  
R : rayon de l'outil en mm  
 $R_{\text{eff}}$  : rayon effectif de coupe en mm  
 $V_c$  : vitesse de coupe en m/min  
 $V_f$  : vitesse d'avance en mm/min  
z : nombre de dents de la fraise  
 $\theta_n$  : angle de dépinçage latérale en degré  
 $\theta_l$  : angle de dépinçage longitudinal en degré



## Introduction

Le développement des pièces aéronautiques en matériau composite passe par l'amélioration des procédés de fabrication pour augmenter la productivité en garantissant le même niveau de qualité. L'étude présentée dans ce mémoire se focalise sur l'usinage de moules en matériaux composites, en considérant les problèmes d'état de surface et de gamme d'usinage.

L'emploi de matériaux composites dans l'industrie aéronautique est en constante augmentation ces dernières années. L'ensemble des constructeurs suit cette tendance afin de rester compétitif et produire des avions plus légers et plus économes en carburant. Ces matériaux prennent peu à peu la place des matériaux conventionnels tels que les alliages d'aluminium et permettent de réaliser des gains de poids conséquents.

Les pièces de structure aéronautiques peuvent être obtenues par les procédés de fabrication de la famille LCM (Liquid Composite Molding). Ce procédé impose une température de fonctionnement élevée pour l'outillage, de l'ordre de 180°C pour une résine époxy, qui conduit à une dilatation du moule néfaste à la qualité dimensionnelle de la pièce injectée. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de réaliser le moule dans un matériau à faible dilatation ou se comportant comme le matériau composite injecté. Pour cela, un matériau composite (Hextool™) est proposé en remplacement des moules métalliques conventionnels.

Ainsi la problématique de ces travaux de thèse porte sur l'usinage de moules en matériaux composites. Cette problématique est particulièrement originale, car généralement les travaux portant sur l'usinage des matériaux composites portent essentiellement sur des opérations de parachèvement comme le détournage ou le perçage. Le Chapitre 1 présente le contexte industriel de la fabrication des pièces de structure aéronautique. Le procédé LCM et différents procédés concurrents sont analysés. De plus, les contraintes particulières sont détaillées et nous posons la problématique d'usinage de moules en matériaux composites.

L'usinage est une étape indispensable de la réalisation d'un moule en Hextool™. L'opération d'usinage de la forme permet de donner les dimensions finales de l'outillage et

conditionne le temps de polissage manuel nécessaire pour atteindre la rugosité arithmétique visée, estimée à  $0,8 \mu\text{m}$  dans notre étude. L'usinage doit donc produire une qualité de surface optimale afin de réduire le temps consacré à l'opération de polissage. C'est pourquoi, les Chapitres 2 et 3 sont consacrés à l'étude micro-géométrique de l'opération de finition de moules en matériaux composites.

Le Chapitre 2 est consacré à l'opération de finition par outil coupant et débute par un état de l'art sur l'usinage des matériaux composites. Un calcul de rugosité théorique et différents essais de coupe permettent de mettre en évidence l'existence d'une valeur minimale de rugosité accessible dans l'Hextool™. De plus, l'analyse de ce phénomène permet de proposer une valeur de prise de passe radiale optimisant le ratio rugosité du moule / temps d'usinage.

Le Chapitre 3 traite de l'automatisation de l'opération de polissage nécessaire. Un état de l'art sur les différents procédés abrasifs est proposé et nous conduit à la définition d'un outil abrasif utilisable sur un centre d'usinage. La faisabilité d'une telle opération et les capacités de cette technologie innovante sont discutées par la suite.

Enfin, le Chapitre 4 s'intéresse au problème de la mise en place d'une gamme d'usinage pour les moules en matériaux composites. En effet, habituellement les opérations d'usinage de matériaux composites se résument à des opérations de perçage et de fraisage-détourage. Il convient alors de proposer une gamme d'usinage ébauche et finition. Le choix des outils, des stratégies d'usinage et de la machine outil ainsi que leurs interactions sont discutés et aboutissent à la proposition d'une gamme de référence.

Une conclusion générale dresse le bilan de ces travaux et propose plusieurs perspectives.

# Chapitre 1 Problématique de la fabrication de pièces en RTM

## 1. Utilisation des matériaux composites dans l'aéronautique

L'emploi de matériaux composites dans l'industrie aéronautique est en constante augmentation ces dernières années. Par exemple, les matériaux composites représentent aujourd'hui 50% du poids du Boeing 787 et de l'Airbus A350. Cette tendance est destinée à s'intensifier avec le lancement des programmes A320 et B737 de nouvelle génération. En effet, l'ensemble des constructeurs souhaite rester compétitif, en atteignant l'objectif de produire des avions plus légers et plus économes en carburant. Ces matériaux prennent alors peu à peu la place des matériaux conventionnels tels que les alliages d'aluminium afin de réaliser des gains de poids conséquents. Par exemple, l'emploi de matériaux composites aurait permis d'alléger l'A350 de 7983 kg [Lorincz06].

Les matériaux composites non naturels sont utilisés pour la première fois lors de la seconde guerre mondiale dans la fabrication de missiles et d'avions militaires du fait de leur rapport résistance / poids avantageux, de leur résistance à la corrosion et à la fatigue. Dès cette époque, plus d'une douzaine de procédés de mise en œuvre de matériaux composites sont employés, soit plus que le nombre de procédés de transformation des métaux développés au cours des deux derniers siècles [Berreur02]. Dans cette industrie récente, les procédés évoluent rapidement compte tenu de l'augmentation de la demande. Ainsi, de nombreuses études et développements sont menés afin d'accroître la robustesse des procédés de mise en œuvre ainsi que leur productivité. En effet, l'industrie du composite ne dispose pas actuellement de l'expérience acquise par l'industrie métallique. La réduction des coûts de

fabrication par la recherche de productivité est un défi qu'elle doit relever afin de rendre les pièces composites compétitives.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au développement des procédés RTM et notamment au développement des outillages nécessaires à leur mise en œuvre.

## **2. Procédés de fabrication**

Ce paragraphe présente les procédés de fabrication permettant de réaliser des pièces aéronautiques. Les différentes variantes du procédé RTM étudiées se positionnent en concurrence avec l'usinage de pièces en alliage d'aluminium.

### **2.1. Usinage de pièces en aluminium**

L'usinage de pièces en alliage d'aluminium est le procédé utilisé historiquement pour les pièces de structure des avions. La pièce est obtenue par enlèvement de matière à partir d'un brut massif. Le volume final peut atteindre seulement 5% du volume du brut de départ [Robert05], ce qui rend conséquent les volumes de matière à enlever. L'utilisation de l'Usinage Grande Vitesse a permis d'augmenter significativement la productivité et de rendre le procédé viable économiquement [Hock97]. Pour cela, les machines 5 axes sont équipées de broches pouvant atteindre 40000 tr/min en rotation et 100 kW de puissance et de moteurs linéaires allant jusqu'à 40 m/min en vitesse de travail. Ainsi le débit de matière peut dépasser 6 litres/min en usinage de poches [Marty10]. Les usinages de poches représentent la majorité des opérations à réaliser afin de réaliser les raidisseurs minces qui permettent de garantir la résistance des pièces tout en limitant leur poids. Ces opérations peuvent être réalisées sur des machines à 3 ou 5 axes, selon que le raidisseur soit perpendiculaire au fond de la poche ou incliné, voire en contre-dépouille [Duc03] (Figure 1-1). En usinage à 5 axes, les deux degrés de libertés supplémentaires en rotation de l'outil permettent d'accroître la productivité grâce à une augmentation de l'accessibilité de l'outil, de minimiser le nombre de posages de la pièce et d'augmenter la largeur coupée en usinage 5 axes en bout avec un outil torique [Duc98].

Ainsi, l'usinage permet d'obtenir des pièces légères usinées dans la masse avec une grande précision dimensionnelle. De plus, contrairement à la mise en forme de pièces en composites, l'usinage de pièce en aluminium ne nécessite pas d'investissements lourds dans des outillages dédiés. Enfin, une grande variété de machines d'usinage est disponible chez de nombreux fabricants de machines outils.

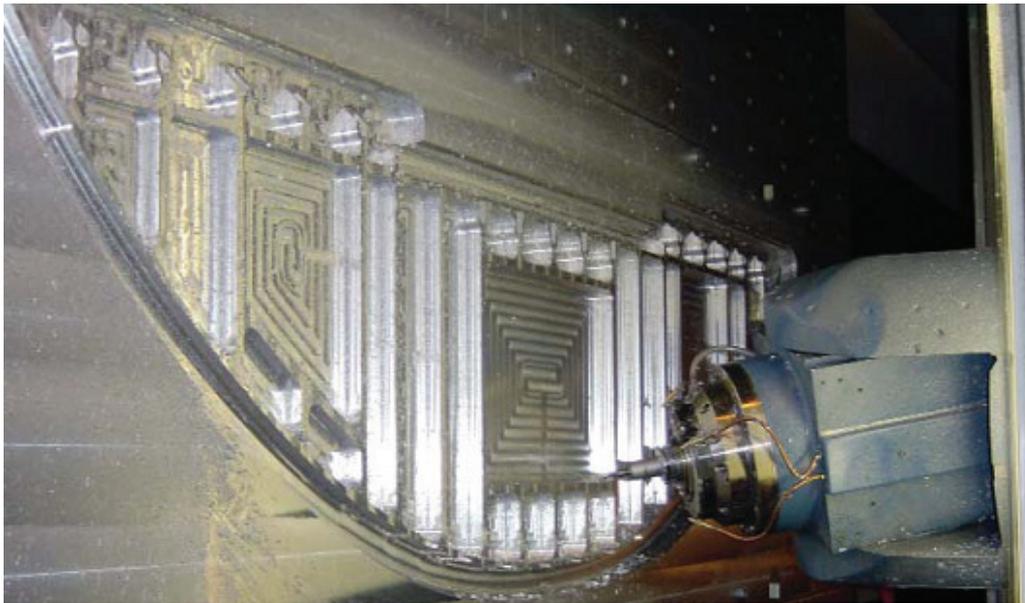


Figure 1-1: fraiseuse 5 axes UGV à table verticale Aérostar Forest-Liné

Toutefois, la fabrication de pièces en matériaux composites nécessite peu d'enlèvement de matière. Les usinages sont en général des opérations de perçage pour les assemblages et des opérations de détournage pour enlever les bavures périphériques de la pièce. Ceci permet de compenser les écarts de prix entre les matériaux. En effet, l'alliage d'aluminium se négocie à environ 6 € le kilogramme contre 250 € le kilogramme pour le carbone [Uimm07].

## 2.2. Les procédés de mise en forme des composites

De nombreux procédés de mise en forme peuvent être utilisés pour obtenir des pièces aéronautiques en matériaux composites. Cette partie présente les procédés les plus couramment employés et leur domaine d'application. Dans de nombreux cas, les pièces obtenues par ce procédé primaire nécessitent des opérations d'usinage complémentaires afin de réaliser les trous et d'atteindre la précision dimensionnelle spécifiées. Il existe deux catégories principales : les procédés d'obtention par moulage avec injection de résine et les procédés sans injection de résine.

### 2.2.1. Procédés d'obtention sans injection de résine

Ces procédés permettent de mettre en forme des pièces à partir de fibre de carbonnes préimprégnées de résine. Il n'y a donc pas d'injection de résine supplémentaire. Il existe différentes façons de mettre en forme les préimprégnés :

**L'enroulement filamentaire** : ce procédé permet l'obtention de pièces creuses par bobinage sur un mandrin de renforts continus imprégnés de résine (Figure 1-2). La tête

d'acheminement du matériau se déplace horizontalement dans un mouvement d'aller-retour [Reyne98].

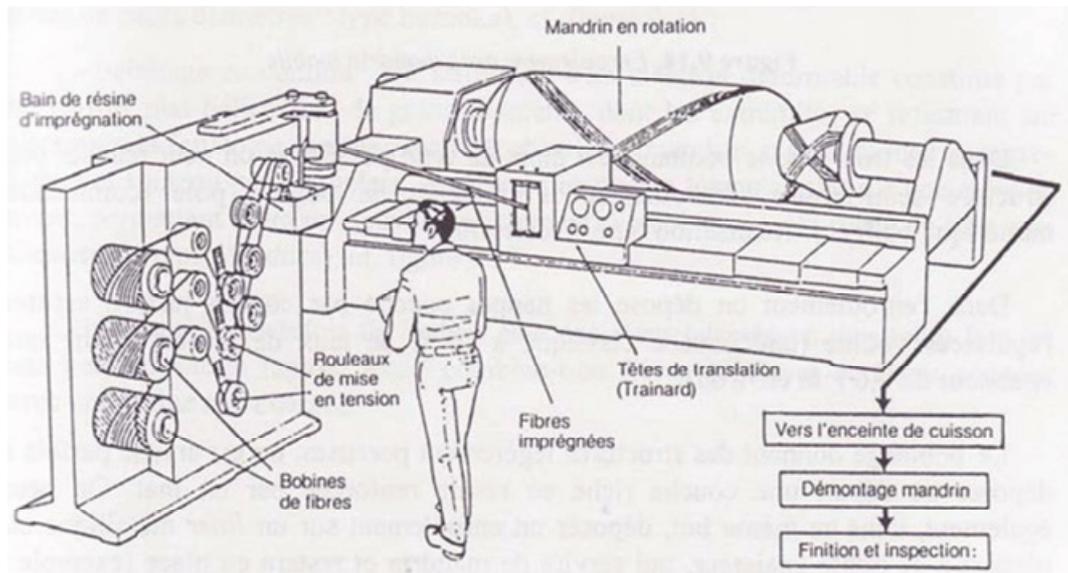


Figure 1-2: installation d'enroulement filamentaire [Reyne98]

Les principales limites de l'enroulement filamentaire sont la difficulté de fabrication de pièces présentant des concavités et la nécessité de retirer le mandrin après la fabrication qui implique parfois l'utilisation de mandrin expansif. Ce procédé est donc en général dédié à la production de géométries simples telles que des cylindres.

**La pultrusion :** ce procédé permet également la production de géométries simples sous forme de profilés.

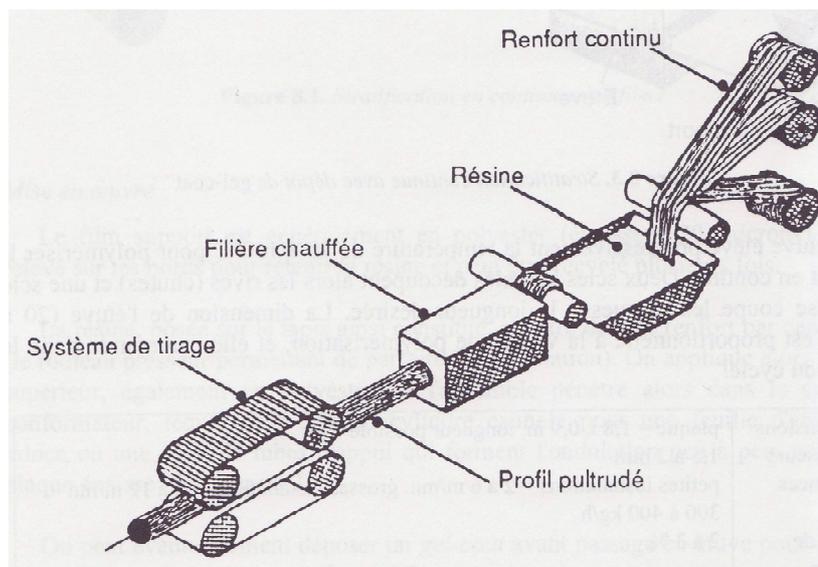


Figure 1-3: principe de pultrusion [Reyne98]

Ce procédé est l'un des rares qui permettent une production en continu. Le procédé consiste, dans un premier temps, à faire passer en continu les fibres de renfort dans un bac de résine puis à mettre en forme le matériau dans une filière avant de le couper à la longueur désirée (Figure 1-3).

La pultrusion est notamment utilisée pour réaliser des profilés employés comme pièces de structure aéronautique. Cependant, les pièces produites sont longues et droites et les fibres peuvent seulement être orientées suivant la direction de pultrusion.

**Les procédés de dépôt de composite :** la dépôt de composite regroupe à la fois les procédés de drapage de bandes et de placement de fibres. Le procédé de drapage de bandes consiste à déposer une succession de plis de préimprégné sur un moule ; un pli est composé d'un ensemble de bandes formant une couche déposée suivant un angle donné (Figure 1-4). Ce procédé est proche de l'enroulement filamentaire, cependant il présente l'avantage de produire des pièces d'épaisseur variable ce qui optimise le rapport résistance / poids de la pièce [Debout10].

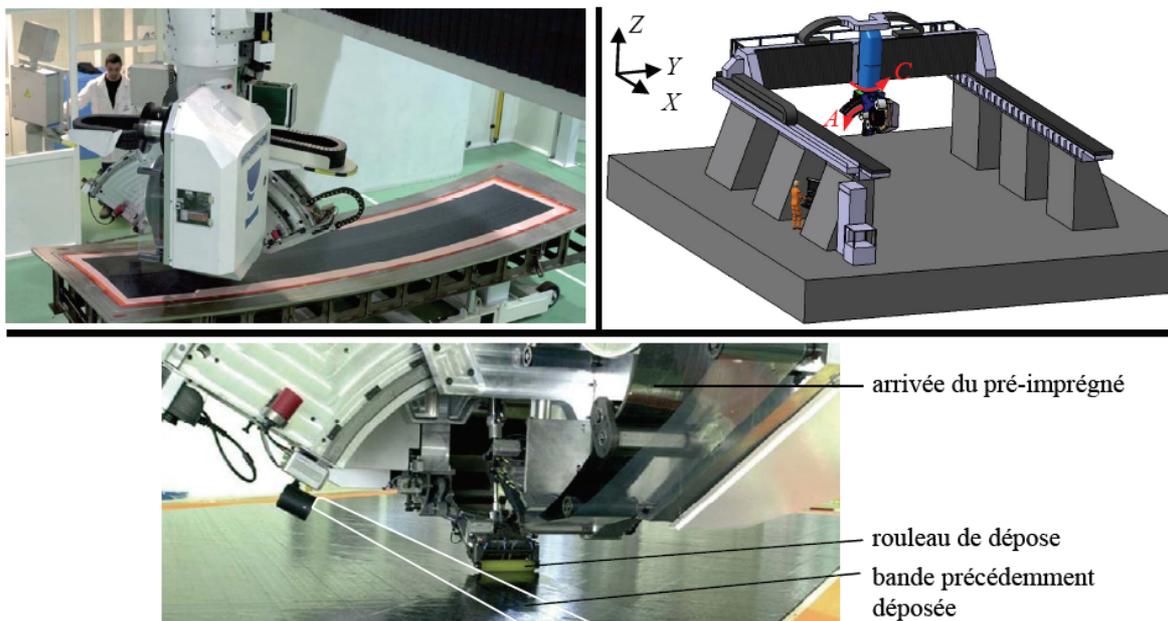


Figure 1-4: machine de drapage Atlas Forest-Liné [Debout10]

Le drapage est particulièrement adapté à la fabrication de pièces dont la surface présente de faibles variations de la courbure, comme par exemple une aile d'avion. Dans le cas de pièce géométriquement plus complexe, la bande de carbone de drapage (largeur de 75 à 300 mm) est remplacée par plusieurs bandes fines, par exemple 32 bandes de 6,35 mm de large. Ce nouveau procédé s'appelle le placement de fibre (Figure 1-5) [Debout10]. Il est

utilisé dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de capots moteur, de conduits d'admission, de pales de turbine et de tronçons de fuselage [Debout11].



Figure 1-5: procédé de placement de fibre

**Mise en œuvre à la presse :** ce procédé permet de mettre en forme des matériaux composites par compression à chaud entre les deux parties d'un moule. Les semi-produits utilisés peuvent être des tissus préimprégnés ou des prémix à fibres courtes. Le procédé est alors appelé respectivement SMC (Sheet Molding Compound) et BMC (Bulk Molding Compound). La résine composant les semi-produits est en général un thermoplastique (Figure 1-6).

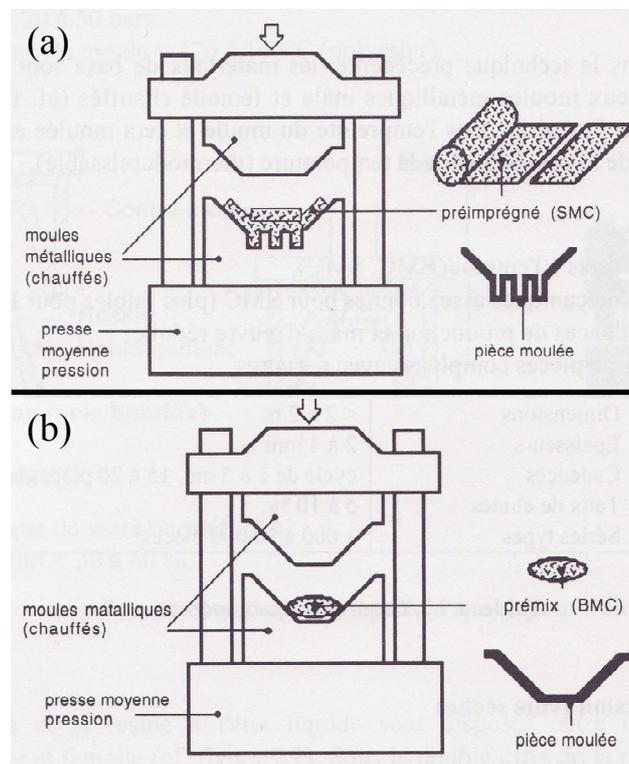


Figure 1-6: (a) procédé SMC ; (b) procédé BMC [Reyne98]

Ce procédé représente 35% en volume de la production mondiale de pièces en matériaux composites [Reyne98]. Il permet la production de géométries complexes, surtout pour le BMC, mais les pièces produites ne présentent pas des performances mécaniques élevées. Ce procédé est largement utilisé par l'industrie automobile, mais son usage pour l'industrie aéronautique est réservé à des pièces peu sollicitées, telles que des pièces d'habillage et des capots

La revue des différents procédés de mise en forme sans injection de résine montre qu'il est difficile de produire des pièces de structure aéronautique présentant une géométrie complexe et des performances mécaniques élevées, tout en maîtrisant l'orientation des fibres.

### 2.2.2. Procédés d'obtention par injection de résine

Les procédés d'obtention de pièces composites par injection de résine peuvent être regroupés dans la famille des procédés LCM (Liquid Composite Molding). Il s'agit d'un procédé par voie humide : une préforme de fibres est placée dans un moule avant que la résine soit injectée (Figure 1-7). La préforme de fibres peut être conformée directement dans le moule ou sur un outillage plus simple (ne comportant pas le système d'injection de résine) par souci de productivité. La préforme peut également être obtenue par un procédé de tissage de fibres.

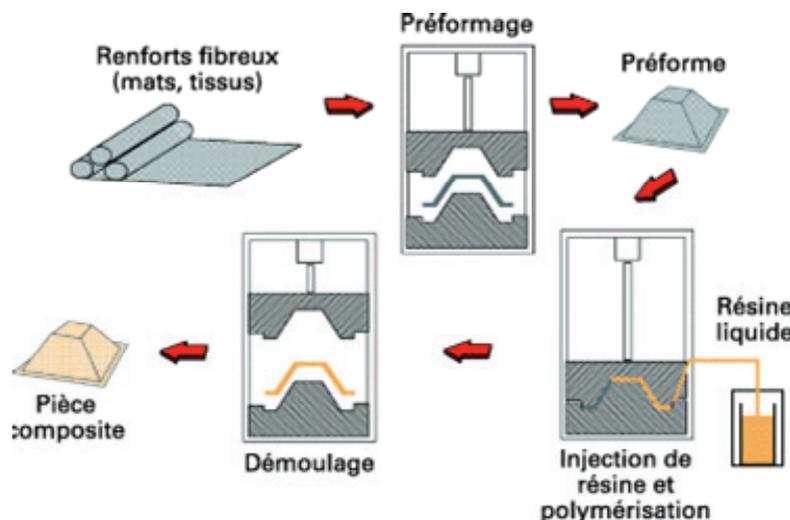


Figure 1-7: schéma de principe du procédé LCM [Binetruy06]

Au sein de la famille LCM, différentes variantes du procédé existent et permettent de fabriquer des pièces avec des niveaux variables de performance et de coût de fabrication. Un aperçu des variantes du procédé LCM les plus répandues est proposé dans le Tableau 1-1.

Nous pouvons noter qu'il est possible de réaliser des pièces creuses avec les procédés LCM en incorporant une vessie gonflable à l'intérieur du moule.

<b>Procédé</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Type d'outillage</b>	<b>Type d'imprégnation</b>
Resin Transfer Molding	RTM	Outillage rigide dédié	- outillage fermé - pilotage de l'injection de la résine par la pression - qualité de pièce et de surface élevée
Resin Transfer Molding light ou Vacuum assisted RTM	RTM-Light ou VARTM	Demi-outillage rigide + bache à vide	- pilotage de l'injection de la résine par une faible pression assistée par le vide
Resin Infusion Molding	RIM	Demi-outillage + bache à vide	- pilotage de l'imprégnation du renfort fibreux par le vide - difficulté pour contrôler l'épaisseur locale de la pièce - difficulté pour produire des parois minces

*Tableau 1-1: variantes des procédés LCM*

Dans le cas où l'épaisseur de la pièce n'est pas critique, il est possible d'utiliser un demi-outillage et de limiter voir d'annuler la pression d'injection de la résine, le procédé est alors baptisé respectivement RTM-Light et RIM. Lorsque le vide est utilisé pour l'imprégnation de la pièce, il est nécessaire d'installer une bache à vide sur le demi-outillage (Figure 1-8). Ces déclinaisons du RTM permettent d'utiliser des outillages moins coûteux, mais en contre partie les géométries fabriquées doivent être moins complexes.

Les travaux menés dans ce mémoire étant focalisés sur les pièces de structure aéronautique, nous nous intéresserons plus particulièrement au procédé RTM qui semble être le plus adapté à la fabrication de ce type de pièce [Mouton10].



Figure 1-8: utilisation d'un outillage RTM-Light avec une bâche à vide (société PCM)

### 2.3. Le procédé RTM et les outillages associés

Le principe du procédé RTM est basé sur l'injection de résine dans un moule fermé contenant une préforme de fibres sèches. Jusque dans les années 60, ce procédé était limité à l'industrie navale pour la réalisation de coques de bateau. A partir du début des années 1980, ce procédé a fait l'objet de nombreuses recherches et d'essais pour l'industrie aérospatiale, les applications visées à l'époque étaient les radomes d'avions. L'évolution de la technologie RTM a été possible grâce aux travaux théoriques permettant d'améliorer la compréhension des phénomènes liés à l'écoulement de la résine dans les renforts fibreux. Aujourd'hui, ce procédé connaît une évolution croissante dans la majorité des secteurs de l'industrie du composite et notamment dans l'aéronautique [Mouton10]. En effet, le procédé RTM permet de réaliser des pièces complexes, présentant une excellente qualité géométrique et structurelle (Figure 1-9).



Figure 1-9: plancher composite moulé par technologie RTM [Binetruy06]

Les pièces fabriquées peuvent aller de 0,1 m<sup>2</sup> à 10 m<sup>2</sup>, les masses varient de quelques grammes à 50 kilogrammes avec des épaisseurs réalisables variant de 2 à 10 mm. De plus, le

travail en moule fermé permet de réduire considérablement les contacts entre l'opérateur et les monomères, ainsi que les émissions de produits nocifs.

Lorsque la résine thermodurcissable a complètement imprégnée la pièce, l'outillage reste fermé et maintenu à température pour réaliser la polymérisation. Cette opération est communément appelée cuisson. La durée de cuisson dure plusieurs heures et varie en fonction du volume et de l'épaisseur de la pièce. Ces temps de cycle longs sont un handicap majeur du procédé RTM et un frein à son utilisation pour une production en grande série [Mouton10]. D'autre part, le moule et la pièce doivent être maintenus à température pendant cette opération, au moyen d'une presse à plateau chauffant ou d'une étuve. La cuisson en étuve est réservée à des productions où la pression d'injection est faible. Dans ce cas, les outillages, dont le dimensionnement est fonction de la pression d'injection, peuvent être plus légers. Ils doivent en contre partie disposer d'un système de fermeture par visserie (Figure 1-10).



*Figure 1-10: moule RTM utilisable en étuve (société PCM)*

Les températures de cuisson varient suivant les résines employées entre 180 et 200 °C. Cette température entraîne des dilatations de l'outillage qui se traduisent par des dispersions dimensionnelles sur les pièces produites, induisant des risques lors de l'assemblage. Des alliages d'aluminium peuvent être utilisés pour les moules, pour des pièces de faibles dimensions et (ou) si la qualité dimensionnelle n'est pas critique. Dans le cas contraire, les moules doivent être réalisés avec des alliages à dilatation contrôlée, comme l'Invar®. Cet alliage (36% nickel, 64% fer) présente un coefficient de dilatation thermique remarquable de  $1.10^{-6} / ^\circ\text{C}$  contre 20 à  $25.10^{-6} / ^\circ\text{C}$  pour les alliages d'aluminium. Mais l'Invar® présente une mauvaise usinabilité, un coût très élevé du à la proportion de nickel, et une densité élevée, qui peut causer des problèmes de manutention pour des outillages aéronautiques dont la taille peut atteindre plusieurs mètres (Figure 1-12).

Ainsi, l'utilisation du procédé RTM reste assez peu répandue en raison de la complexité de sa mise en œuvre [Mouton10]. De nombreux programmes de recherche académiques et industriels lui sont dédiés, pour dépasser ces limites actuelles car ce procédé représente un enjeu important pour la fabrication en grande série de pièces de l'industrie composite. En particulier, ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet LCM-Smart qui a pour objectifs :

- de développer des outils de simulations numériques permettant la modélisation complète et l'optimisation de l'injection de résine (écoulement et temps d'injection, déformation des moules notamment).
- de proposer un pilotage assisté en temps réel du procédé, via le développement d'une plateforme de régulation assurant une qualité répétable et une réduction des taux de rebut actuels.
- d'équiper les moules avec une instrumentation in-situ, par des capteurs intégrés peu intrusifs à base de fibre optique (écoulement, température et déformations).
- D'étudier la faisabilité de moules en matériaux composites et de proposer une gamme de fabrication optimale.

Ainsi, une partie du projet est consacrée à l'étude de la pertinence de l'utilisation de moules composites pour les procédés RTM en remplacement des alliages en aluminium ou à dilatation contrôlée. Pour cela, un matériau composite spécifique a été développé par la société Hexcel Composites, dont l'usinage est étudié dans ce mémoire. Dans la partie suivante, les avantages et les particularités de ce matériau sont décrits et la problématique de la réalisation de moule en composite est posée.

### **3. Problématique de la fabrication de moule en Hextool™**

#### **3.1. Description et intérêts de l'Hextool™**

L'Hextool™ est un matériau composite produit par Hexcel Composites. Il est composé de rubans de préimprégnés coupés de fibres de carbone unidirectionnelles de 8x50 mm orientés de façon quasi isotrope dans le plan du pli (Figure 1-11). Cette répartition quasi-isotrope des fibres dans le plan moyen du moule lui confère des propriétés thermo-élastiques en général proche de celles de la pièce composite réalisée, réduisant de ce fait les interactions moule-pièce et améliorant la qualité dimensionnelle des pièces produites. En effet, il présente un coefficient de dilatation thermique de l'ordre de  $5.10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (voir Tableau 1-2) dans le plan de dépôt des préimprégnés (plan X-Y) proche de celui de l'Invar®. En général le plan de

dépose correspond à la direction principale de la pièce à fabriquer. Les fibres représentent 60% du volume et la résine bismaléimide (BMI), soit 38% de la masse du préimprégné. La société produit deux matériaux : Hextool™ M61 et Hextool™ M81, qui est composé d'une résine époxy. Dans la suite de ces travaux, nous considérons l' Hextool™ comme l' Hextool™ M61.



Figure 1-11: Hextool™ sous forme de préimprégnés et usiné

Comme ce matériau est composé d'une résine thermodurcissable (BMI), une étape de cuisson en autoclave est nécessaire au durcissement de la résine. Le matériau cuit est alors composé de plis de 1,25 mm, ses propriétés apparaissent dans le Tableau 1-2.

Propriétés	Unité	Condition	Méthode	Valeur
<b>Dureté Rockwell B</b>	-	Côté usiné	-	83
		Côté moulé		78
<b>Température de transition vitreuse</b>	°C	sec	DMA	275
		humide		230
<b>Coefficient de dilatation thermique</b>	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Plan X-Y	ASTM E831	5
		Z		49
<b>Résistance en traction</b>	MPa	Sec 23°C	EN2561	260
		Sec 180°C		210
<b>Module en traction</b>	GPa	Sec 23°C	EN2561	41
		sec 180°C		40

Tableau 1-2: propriétés de l'Hextool™ à l'état cuit

Ce matériau est destiné à la production de moules et d'outillages employés pour la fabrication de pièces en matériaux composites par le procédé RTM, par les procédés de drapage (Figure 1-12) ou par le procédé RTM-Light (Figure 1-13).

(a) Mandrin en Hextool™ (1558kg) (b) Mandrin en Invar® (5443kg)



Figure 1-12: mandrin de drapage réalisé en Hextool™ et en Invar®



Figure 1-13: moule en Hextool™ pour RTM-Light (société NovaTech)

L'emploi de l'Hextool™ pour les outillages permet un gain de masse conséquent par rapport à l'Invar® (Figure 1-12) tout en offrant une qualité dimensionnelle satisfaisante aux pièces réalisées. De plus, il permet l'intégration de capteurs in-situ dans les moules ce qui n'est pas possible avec des moules métalliques. Enfin, le prix de revient d'un moule composite devrait être inférieur à celui d'un moule à dilatation contrôlé, mais l'industrialisation n'est pas encore suffisamment avancée pour le confirmer. La gamme de réalisation d'un moule composite est présentée par la suite.

### 3.2. Méthode de fabrication de moules

Pour réaliser un outillage en Hextool™, la première étape consiste à découper les différents plis de préimprégnés nécessaires à la dépose à l'aide d'un couteau pneumatique, électrique ou à ultrasons. Ensuite les plis sont déposés sur un maître modèle qui confère au moule sa géométrie. L'épaisseur finale du moule varie suivant les sollicitations qui lui sont imposées, qui dépendent de la pression d'injection de la résine et de la cuisson (sous presse ou en étuve). Le moule obtenu après cuisson est une coque de 10 à 20 mm d'épaisseur. Pour certaines applications, le moule peut présenter une structure de type squelette ou être plein avec une âme en mousse (Figure 1-14). Dans ce cas, la réalisation d'un maître modèle n'est plus nécessaire.

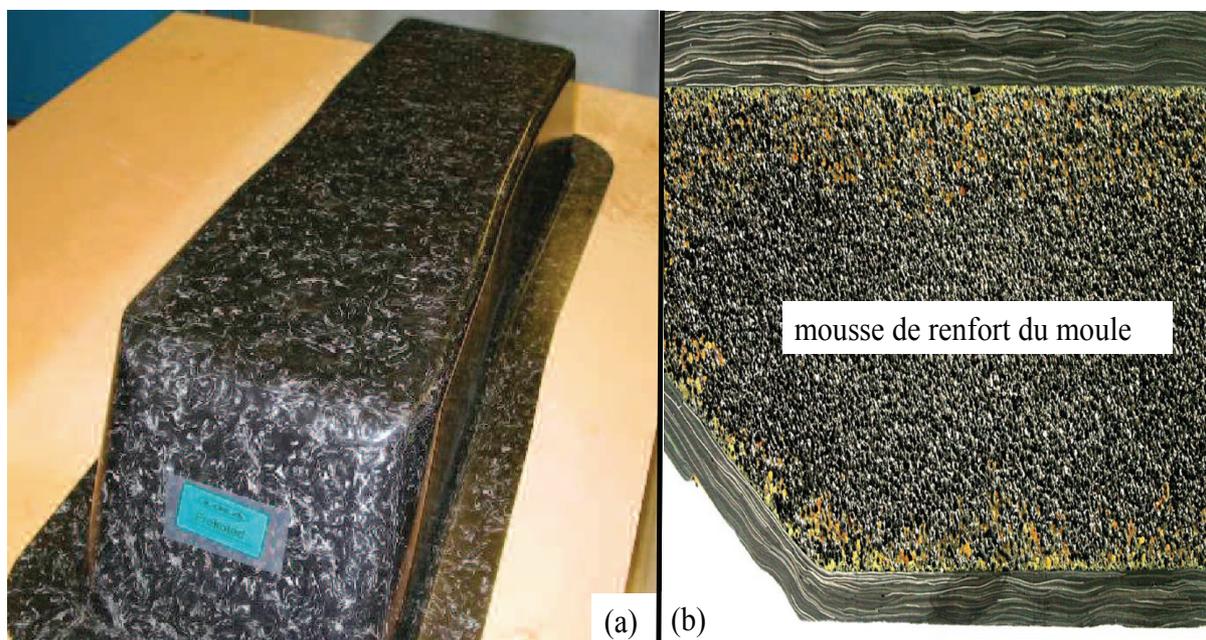


Figure 1-14: (a) moule en coque ; (b) coupe d'un moule avec une âme en mousse

Une fois la dépose des préimprégnés réalisée, le moule est cuit en autoclave pour permettre la réticulation de la résine bismaléimide. Le cycle de cuisson suivant est réalisé :

▪ **Cuisson**

- Application du vide (< 0,85 bar)
- Chauffage à 135°C (vitesse comprise entre 0,5 et 2°C/min)
- Maintien à 135°C pendant 30 minutes
- Application d'une pression de 7 bars
- Chauffage à 190°C (vitesse comprise entre 0,25 et 1°C/min)
- Maintien à 190°C pendant 240 minutes
- Refroidissement à 150°C (vitesse de 0,5°C/min)
- Refroidissement de 150°C à 60°C (vitesse de 1°C/min)
- Libération de la pièce à 60°C

Un cycle de post-cuisson est, alors, réalisé :

▪ **Post-cuisson :**

- Chauffage à 150°C (vitesse comprise entre 0,5 et 2°C/min)
- Chauffage à 220°C (vitesse comprise entre 0,25 et 1°C/min)
- Maintien à 220°C pendant 16 heures
- Refroidissement à 150°C (vitesse de 0,5°C/min)
- Refroidissement de 150°C à 60°C (vitesse de 1°C/min)

La réalisation des moules par dépose de préimprégnés offre la possibilité d'intégrer des capteurs in-situ dès la fabrication du moule en autoclave ce qui permet d'entrevoir la production de moules instrumentés de façon relativement aisée et peu coûteuse. De plus, cette technologie présente une facilité de rechargement en matière (par drapage d'une nouvelle couche de préimprégnés) permettant de réduire les temps de développement et le coût d'outillage par rapport aux moules en matériaux métalliques, surtout dans le cas de pièces complexes ou grandes (Figure 1-15).



Figure 1-15: réparation d'un moule en Hextool™

Cependant, chaque pli de préimprégné ne présente pas une épaisseur constante, du fait de l'utilisation de rubans de fibres. Au gré de l'empilement des plis, cette épaisseur non constante génère une surface ondulée sur le côté libre de la matière (Figure 1-16).

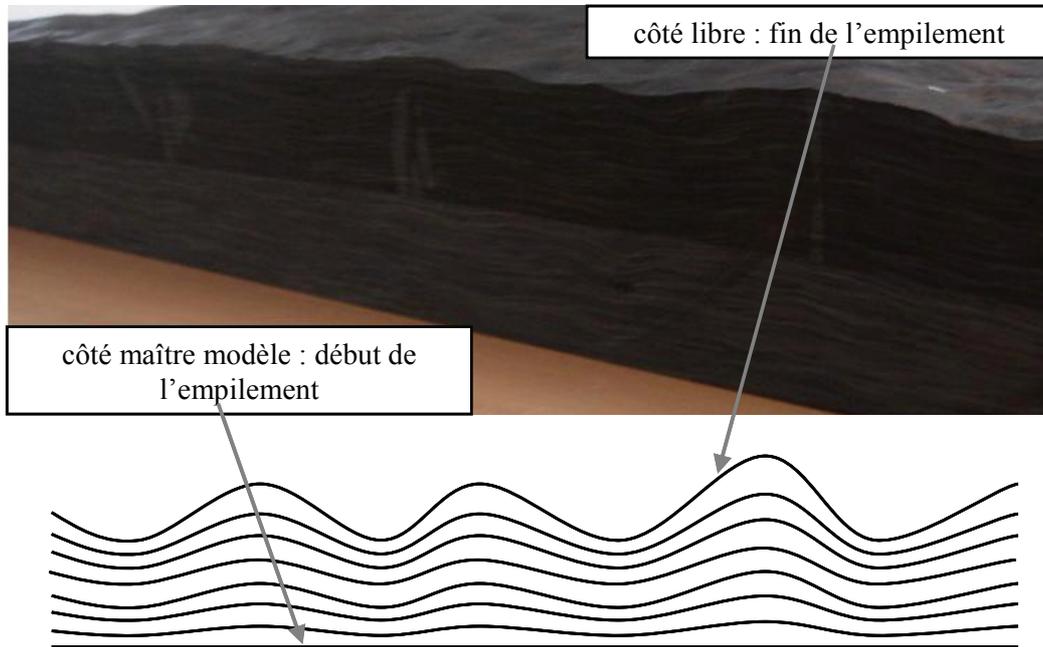


Figure 1-16: phénomène d'ondulation sur le côté libre de la matière du à l'empilement

Ce phénomène d'ondulation est bien entendu dépendant du nombre de plis composant le moule en Hextool™. L'amplitude de ces ondulations représente 10 à 20% de l'épaisseur du moule. Cette amplitude conditionne l'épaisseur de matière à retirer lors de l'opération d'usinage du moule. En règle générale, une épaisseur d'environ 10 mm est retirée par usinage afin d'atteindre les dimensions finales du moule (Figure 1-17).

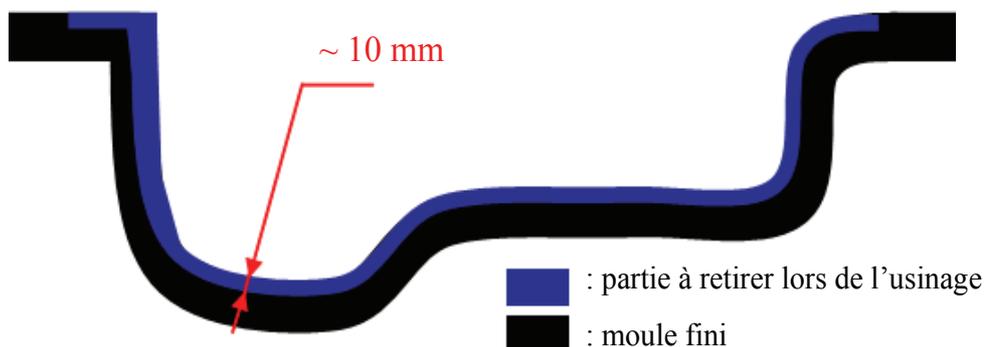


Figure 1-17: épaisseur moyenne de matière à retirer lors de l'usinage d'un moule

L'épaisseur de matière à retirer par usinage peut être plus faible si la partie active du moule (en contact avec la pièce) est en contact avec le maître modèle lors de la dépose et de la cuisson. En effet, dans ce cas la face active ne présente pas d'ondulation. Toutefois, l'opération d'usinage demeure indispensable. Dans ce cas, une épaisseur minimale de 1 mm

doit être retirée. Nous constatons alors que l'opération d'usinage du moule est une étape indispensable de l'élaboration d'un moule en composite.

### **3.3. Problématique industrielle de l'usinage de moule en composite**

L'usinage des moules en Hextool™ doit permettre d'atteindre les dimensions finales désirées de l'outillage. De plus, le moule doit présenter une qualité de surface suffisante pour éviter l'encrassement de l'outillage et faciliter le démoulage de la pièce. Actuellement, les partenaires industriels du projet (SKF Aerospace et Isoire Aviation) souhaitent une rugosité arithmétique ( $R_a$ ) de  $0,8 \mu\text{m}$  pour leurs outillages. Cette spécification est une valeur couramment exigée pour les outillages métalliques utilisés pour les procédés RTM. Elle permet donc une comparaison simple entre les deux technologies, alors que la spécification d'un tel critère dans le cas d'un matériau composite, par définition hétérogène, reste sujette à caution. Cependant, ce critère présente l'avantage d'être connu par l'ensemble des acteurs de la filière et permet une continuité entre les moules métalliques et en matériaux composites. Nous avons donc choisi de garder cette spécification sciemment, sachant qu'elle induit une grande incertitude. De plus, il n'existe pour l'instant aucune norme définissant des critères spécifiques pour la rugosité des matériaux composites hétérogènes.

L'usinage de matériaux composites à renforts fibreux est fondamentalement différent de l'usinage des métaux sur de nombreux points de vue [Arola96], [Bhatnagar94], [Davim05bb], [Eriksen99], car il peut conduire à des phénomènes de délaminage et d'arrachements lors de la coupe [Rahman99], [Wang03]. Ces arrachements nuisent à la qualité de surface obtenue. Des essais d'usinage menés avec différents types d'outils (carbure, PCD) montrent que dans l'Hextool™ la rugosité arithmétique produite par un outil coupant est limitée à  $1,8 \mu\text{m}$  [Chardon10c]. La spécification d'état de surface ne peut pas être obtenue uniquement par usinage. Actuellement, une opération de polissage manuelle avec des papiers abrasifs de différentes granulométries est pratiquée jusqu'à l'obtention d'une rugosité arithmétique de  $0,8 \mu\text{m}$ .

La problématique industrielle de ces travaux est donc de proposer un processus de fabrication pour moules en composite, permettant d'obtenir un outillage présentant la qualité de surface attendue tout en garantissant la meilleure productivité. En d'autres termes, l'objectif est de minimiser la rugosité obtenue par usinage afin de réduire, voire de supprimer, l'opération de polissage manuelle. Dans ce mémoire, nous comprenons l'usinage, comme l'enlèvement de matière par outil coupant ou abrasif sur machine à commande numérique.

Pour conclure, l'objectif industriel est alors de fournir les éléments nécessaires à l'établissement d'une gamme complète d'usinage et de prédire la qualité de surface obtenue pour une géométrie de moule quelconque. Afin d'atteindre cet objectif, les voies de recherche scientifique suivantes sont abordées.

### **3.4. Problématique scientifique**

Afin de répondre à cette problématique industrielle, il est nécessaire de maîtriser le processus d'enlèvement de matière d'un point de vue micro-géométrique avec des outils coupants et abrasifs. En effet, le temps de polissage manuel peut être significativement réduit si la rugosité atteinte après l'opération d'usinage est contrôlée [Lee06]. Nos travaux se concentrent, donc sur une étude de l'opération de finition par outil coupant. Le motif laissé par l'outil sur le moule est étudié et les limites en termes de rugosité accessible sont évaluées. Ces travaux constituent une première voie d'amélioration.

D'autre part, une technologie d'outil abrasif a été développée en collaboration avec la société Asahi Diamond Industrial Europe. Ce type d'outil peut être utilisé sur un centre d'usinage et permet d'atteindre une rugosité satisfaisante vis-à-vis des exigences industrielles. En effet, avec cette technologie, l'opération de polissage manuelle peut être supprimée. Le développement et l'étude de la performance et des limites de ce type d'outil constituent une deuxième voie d'amélioration.

L'étude de ces deux voies d'amélioration qui traitent de l'étude micro-géométrique de l'opération de finition de l'Hextool™ est présentée dans le chapitre 2 et 3. A travers ces travaux, des éléments de réponse sont apportés aux trois problèmes scientifiques suivants :

- définir des couples outil-matière stables et performants pour les diverses technologies d'outil du marché (carbure revêtu, diamant polycristallin, outil abrasif revêtu diamant...), dans le cadre de l'usinage de matériaux composites.
- évaluer les prises de passe et les surépaisseurs admissibles garantissant l'intégrité du moule afin de définir les différentes opérations qui composent la gamme d'usinage du moule (semi-finition, finition, meulage).
- prédire les hauteurs de crête et la rugosité obtenue dans l'Hextool, pour différentes géométries et paramètres de coupe, afin de déterminer le type de trajectoire optimale (type de balayage, prise de passe radiale...) pour une qualité de surface donnée.

La levée de ces trois verrous scientifiques devrait permettre de proposer une méthodologie d'établissement de gammes d'usinage de moules en composite, pour une

qualité de surface donnée. Ainsi, le chapitre 4 propose une synthèse des travaux réalisés, afin de considérer d'une façon globale le processus de fabrication de moules en Hextool™. Une étude technico-économique intégrant le choix de la machine outil, des opérations d'usinage et des outils est alors menée. Cette étude aboutit à la proposition d'un processus de fabrication pour moules en composite, permettant d'obtenir un outillage présentant la qualité de surface attendue tout en restant productif et économiquement viable. Ce processus optimisé pour la fabrication de moules en matériaux composites constitue la troisième voie d'amélioration. Cette méthodologie est validée sur les démonstrateurs de laboratoires ainsi que les démonstrateurs industriels du projet LCM-Smart. Ces outillages de démonstrateurs permettent de mettre en application ces travaux et illustrent le chapitre 4.



## Chapitre 2 Finition avec outil coupant

L'usinage est une étape indispensable à la réalisation d'un moule en Hextool™. En effet, une opération d'usinage de forme permet de donner les dimensions finales de l'outillage et conditionne le temps de polissage manuel nécessaire pour atteindre la rugosité arithmétique visée, qui vaut  $0,8 \mu\text{m}$  dans notre étude. En effet, il est essentiel de maîtriser la rugosité générée par l'usinage afin de réduire le temps consacré à l'opération de polissage [Lee06]. Pour cela, une étude micro-géométrique du procédé d'usinage par outil coupant en finition est réalisée.

Tout d'abord, un état de l'art sur l'usinage des matériaux composites est présenté. Les matériaux composites les plus couramment rencontrés sont détaillés, leurs propriétés spécifiques et leur impact sur l'usinage sont alors analysés. Les opérations de perçage et de fraisage-détourage indispensables au parachèvement des pièces et à l'assemblage représentent la grande majorité des applications d'usinage de matériaux composites. Les problématiques associées et les solutions apportées, notamment à travers le développement d'outils, sont discutées.

Le fraisage de forme de matériaux composites restent une opération marginale dans l'industrie, le niveau d'expertise pour ce type d'opération est donc faible. La maîtrise de cette opération est pourtant indispensable à la réalisation d'un moule en Hextool™. Pour cela, le motif laissé par l'outil sur un moule lors d'une opération de finition par balayage en plans parallèles est étudié. Par la suite, différents essais permettent de mettre en évidence l'apparition d'un seuil de rugosité minimale accessible. Enfin, l'identification de ce phénomène de seuil de rugosité permet de proposer une valeur de prise de passe radiale optimisant le ratio qualité de surface / temps d'usinage.

## **1. Etat de l'art sur l'usinage de composites**

L'usinage des matériaux composites se différencie de l'usinage des matériaux métalliques homogènes essentiellement par leur hétérogénéité intrinsèque. Cette hétérogénéité engendre des phénomènes de coupe différents qui ont un impact fort sur le choix des outils, de leurs conditions d'utilisation et de la qualité des usinages produits [Bhatnagar94]. De plus, il existe une grande variété de matériaux composites. En effet, différents types de matrices et de renforts peuvent être mis en œuvre suivant plusieurs procédés (cf. Chapitre 1) générant ainsi un large panel de matériaux aux caractéristiques particulières. De plus, la difficulté à usiner cette grande variété de matériaux est accrue par un niveau de connaissance et d'expertise faible sur leur comportement en usinage. Par la suite, un inventaire non exhaustif des différents matériaux composites est proposé, il est suivi d'une présentation des applications courantes d'usinage de composites et des travaux associés à ces opérations.

### **1.1. Caractéristiques des matériaux composites**

Du fait de l'hétérogénéité, les propriétés de coupe des matériaux sont directement liées aux différents types de matrices et de fibres utilisés et à leurs interactions. Ce paragraphe propose un inventaire des composants couramment rencontrés et des différents types de matériaux pouvant être élaborés. Cette présentation se limite aux matériaux composites à matrice organique et à renforts fibreux qui représentent 99% du marché [Reyne98]. Néanmoins, il existe aussi des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique), dont la diffusion reste encore marginale.

#### **1.1.1. Les matrices**

La matrice sert à lier les fibres de renfort, à répartir les efforts et permet aussi de donner la forme voulue à la structure [Reyne98]. Les résines thermodurcissables (TD) sont les plus utilisées en raison de leur coût, de leur facilité de mise en œuvre et de leur performance. Cependant l'emploi de résines thermoplastiques (TP) se développe de plus en plus, notamment avec l'évolution des procédés de fabrication. Le Tableau 2-1 résume les différences fondamentales de ces deux types de matrice [Reyne98]. Pour les TP, les résines les plus utilisées sont les technoplastiques ainsi que le polypropylène qui présente l'avantage d'être peu onéreux [Reyne98] (voir le Tableau 2-2). En ce qui concerne les résines TD, le polyester est le plus utilisé pour les applications courantes, les résines époxydes sont réservées à des applications plus exigeantes, notamment aéronautiques.

	<b>TP (thermoplastiques)</b>	<b>TD (thermodurcissables)</b>
<b>Etat de base</b>	Solide (prêt à l'emploi : polymérisé)	Liquide visqueux (à polymériser)
<b>Stockage matière de base</b>	Illimité	Temps réduit (en moyenne 20 jours à 20°C et 6 mois à -18°C)
<b>Mouillabilité des renforts</b>	Difficile	Aisée
<b>Moulage</b>	Chauffage (fusion/ramollissement) + refroidissement	Chauffage continu
<b>Cycle</b>	Court	Plus long (polymérisation)
<b>Caractéristiques spécifiques :</b> - tenue aux chocs - tenue thermique  - chutes et déchets - conditions de mise en œuvre	Assez bonne Réduite  Recyclables Bonnes + propreté	Limitée Bonne par rapport au TP  Perdus (ou utilisés comme charges) Emanations pour méthode humide (allergies possibles)

Tableau 2-1: critères essentiels des matrices TP et TD [Reyne98]

Reyne propose une analyse du comportement des résines lors de la coupe [Reyne98]. Certaines propriétés des matrices ont une influence directe sur leur usinabilité. En particulier, il convient de choisir des conditions d'usinage ne provoquant pas une hausse de température trop importante, sous peine de dégrader le matériau, car les matrices ont une tenue à la chaleur faible (entre 100 et 200°C). De plus, la lubrification est délicate à mettre en œuvre, car certaines matrices sont sensibles à l'humidité (polyamide, résine phénolique, époxyde...). Enfin, la plupart des matrices comportent des adjuvants (plastifiants, tensioactifs, stabilisants, catalyseurs...) qui modifient leurs propriétés. Il est donc indispensable de caractériser précisément la nature de la matrice du composite à usiner pour proposer un choix optimisé des conditions de coupe.

TP (thermoplastiques)	TD (thermodurcissables)
<p><b>Polymère grande diffusion :</b></p> <p>Polypropylène (PP)</p> <p><b>Technoplastiques :</b></p> <p>Polyamide (PA)</p> <p>Polytéréphtalate éthylénique (PET)</p> <p>Polytéréphtalate butylénique (PBT)</p> <p>Polycarbonate (PC)</p> <p>Polyoxyde de phénylène (PPO)</p> <p>Polyoxyméthylène (POM)</p>	<p>Polyester</p> <p>Vinylester</p> <p>Phénolique</p> <p>Epoxyde</p> <p>Polyuréthane</p> <p>Bismaléimide (Hextool™)</p>

Tableau 2-2: matrices les plus utilisées pour les matériaux composites [Reyne98]

### 1.1.2. Les renforts

En général, les structures composites ont un comportement anisotrope, les fibres ont de bonnes performances en traction, moins bonnes en compression et une faible résistance au cisaillement. Afin d'obtenir une structure résistante suivant des directions privilégiées, les fibres sont associées suivant un motif. En fonction des propriétés recherchées, trois typologies de renforcements peuvent être distinguées (Figure 2-1).

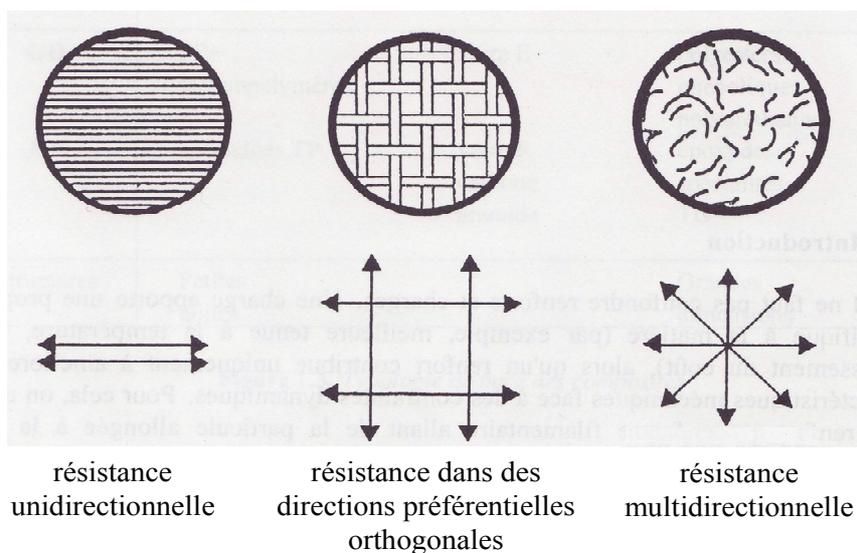


Figure 2-1: typologie de base des renforcements

Ces typologies de renforcements peuvent se traduire par des types de renforcements différents (Tableau 2-3).

Résistance recherchée	Type de renforcement
<p><b>Unidirectionnelle</b></p>	<p>- Fils parallèles sans torsion dit « roving »</p> <p>- Nappe de fils</p> <p>- Fils coupés</p>
<p><b>Multidirectionnelle :</b></p> <p>- directions privilégiées</p>	<p>- Mat à fibres continues</p> <p>- Tissu bi ou tri directionnel</p> <p>- Tresse</p>
<p>- directions aléatoires</p>	<p>- Feutre de fils coupés dit « mats »</p>

Tableau 2-3: types de renforcements [Reyne98]

Ces différents types de fibres se déclinent suivant divers matériaux :

- **Les fibres de verre :** ce sont les fibres les plus couramment utilisées, elles représentent 99% du marché si l'on ne tient pas compte du caoutchouc renforcé (pneumatique par exemple) [Bathias05]. Elles se déclinent sous toutes les formes citées dans le Tableau 2-3. De plus, il existe trois nuances de fibre de verres : E (usage courant), D (ayant des bonnes propriétés diélectriques, utilisées pour les circuits imprimés) et R (offrant une haute résistance mécanique). Les fibres de verre sont dures et abrasives, donc très usantes pour les outils de coupe.
- **Les fibres de carbone :** elles sont très coûteuses mais offrent des propriétés mécaniques supérieures aux fibres de verre en termes de résistance mécanique et de module d'élasticité. Elles sont également dures et donc usantes pour les outils, cependant le carbone joue un rôle de lubrifiant et améliore l'usinabilité [Bathias05]. Il existe deux grandes familles de fibre de carbone : les fibres à haute résistance mécanique et les fibres à haut module d'élasticité.
- **Les fibres organiques :** il en existe une multitude de fibres organiques (polyamide 6-6, polyester, nomex, aramide, zylon, dyneema...), la plus utilisée étant la fibre d'aramide souvent appelée Kevlar®. La fibre d'aramide se déforme plastiquement en compression, elle est tenace, il est donc difficile de la couper et de l'usiner [Bathias05].

Il existe également des fibres aux oxydes de bore et au carbure de silicium, ces fibres sont surtout utilisées pour renforcer des composites à matrice métallique ou céramique

[Bathias05]. Les fibres renforts sont caractérisées par leur titre (tex) qui correspond au poids en grammes d'un kilomètre de fil [Reyne98].

### 1.1.3. Les composites

Le développement des matériaux composites est assez récent et connaît une évolution permanente et rapide. Les matériaux composites sont des matériaux « à la carte », en effet pour une structure donnée, Les propriétés physiques et mécaniques peuvent être ajustées en fonction du type de matrice, de renforts et de l'orientation. Il existe donc une grande variété de matériaux employés, chacun possédant son propre comportement lors de l'usinage. Les systèmes sandwich viennent compléter ce panel de matériaux. Ils proposent un compromis permettant à la fois de rigidifier et d'alléger une structure mais aussi de l'isoler thermiquement et phoniquement. Un composite sandwich est composé de trois éléments de base [Reyne98] (Figure 2-2) :

- **L'âme** qui, sous une faible masse spécifique, apporte une tenue à la flexion. Elle supporte les efforts de compression et de cisaillement et peut jouer un rôle d'isolant.
- **Les peaux**, généralement planes, en composites (GD ou HP) qui supportent les efforts de flexion.
- **L'adhésif de surface**, ou interface, qui solidarise ces trois éléments.

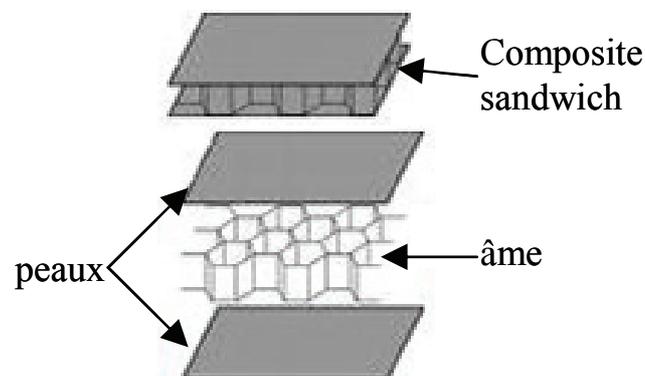


Figure 2-2: composite sandwich avec une âme en nid d'abeilles

La grande diversité des matériaux composites rend complexe la définition d'opérations d'usinage. Comme ces procédés permettent d'obtenir une géométrie très proche de la géométrie finale de la pièce, les usinages à réaliser sont donc généralement limités à des opérations de détournage et de perçage. En effet, les procédés de mise en forme rendent souvent indispensable une opération de détournage pour retirer la bavure et une opération de perçage pour réaliser les ouvertures de faible diamètre nécessaires à l'assemblage. Malgré les

techniques d'assemblage par collage (pour les TD) et soudage par fusion ou ultrasons (pour les TP), les assemblages par rivetage ou boulonnage sont largement employés [Reyne98].

## 1.2. Usinage des matériaux composites

### 1.2.1. Modèles de coupe des matériaux composites

De nombreuses études ont été menées sur la coupe des composites afin de déterminer des modèles de coupe. Un modèle de coupe permet de prédire l'usure des outils [Rahman99] et [Palanikumar07a], les efforts de coupe [Wang03] et [Mkaddem08], voire les états de surface obtenus [Palanikumar06], [Palanikumar07b] et [Kini10]. Actuellement aucun modèle de coupe générique pour les composites n'a été développé, à cause de la grande diversité des matériaux rencontrés et de leur comportement hétérogène. Par la suite, les différentes pistes étudiées dans les travaux de recherche sont présentées.

Tout d'abord, la plupart des études menées pour développer des modèles de coupe traitent de la coupe orthogonale des composites à fibres longues car ils représentent la grande majorité des applications. Le phénomène mise en œuvre dépend de l'orientation des fibres et le mécanisme de coupe évolue avec l'angle entre la direction d'avance et l'orientation des fibres [Arola97], [Teti02]. La plupart des articles s'accordent sur le fait que l'on peut distinguer quatre mécanismes de coupes selon l'orientation des fibres (Figure 2-3).

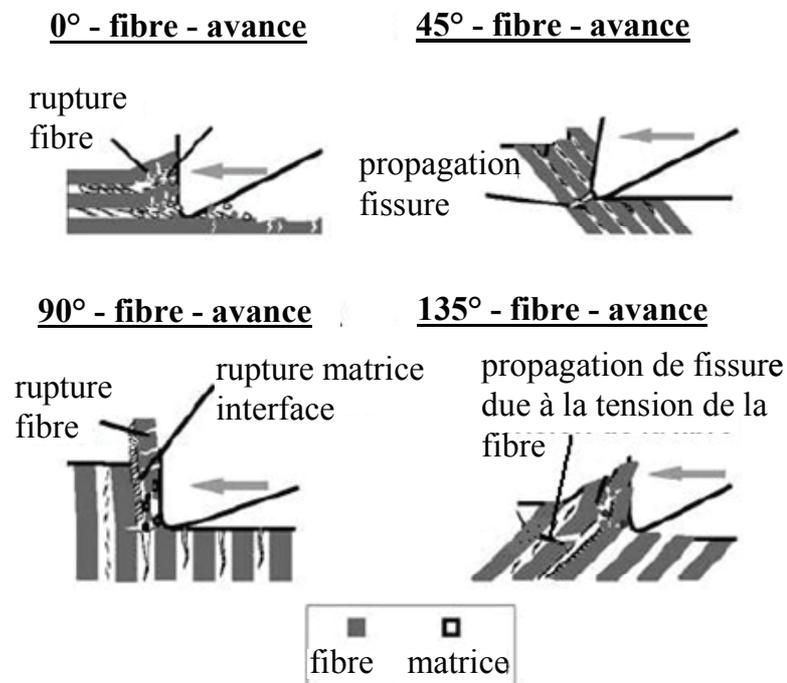


Figure 2-3: les quatre mécanismes de coupe [Teti02]

Ainsi, l'enlèvement de matière provient de la combinaison de deux modes de rupture (Figure 2-3 et Figure 2-4), [Arola97], [Rao06] :

- Le mode I (opening mode) : rupture par flexion de la fibre due et à la pression exercée par l'outil.
- Le mode II (sliding mode) : glissement de la fibre par rapport à la matrice.

Dans certaines publications, les modes I et II sont appelés respectivement fractures primaire et secondaire [Arola97]. L'enlèvement de matière est alors une combinaison de ces deux modes de rupture dont l'influence relative varie avec l'orientation des fibres et amène à distinguer les quatre mécanismes de rupture présentés sur la Figure 2-3 [Teti02]. Les efforts de coupe et les états de surface générés varient donc suivant l'orientation des fibres. Afin de mieux appréhender ces phénomènes, de nombreux travaux traitent de la formation des copeaux lors de l'usinage de matériaux composites [Arola96], [Lasri09].

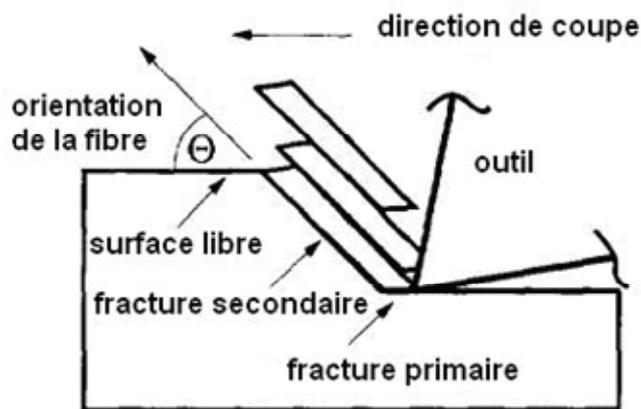


Figure 2-4: formation du copeau lors de la coupe orthogonale [Arola97]

Si la plupart des travaux s'accordent sur ces quatre mécanismes de coupe, il n'en est pas de même pour les modèles de prédiction d'usure d'outil, d'efforts de coupe ou d'état de surface. Plusieurs pistes ont été explorées soit de façon expérimentale à l'aide de plans d'expérience [Davim05a], [Arola97] pour identifier les paramètres influents (vitesse de coupe, avance, géométrie d'outil), soit de façon théorique par la construction de modèles analytiques souvent dérivés de la théorie de Merchant [Bhatnagar94], [Chang06] ou encore la construction de modèles éléments finis (Figure 2-5). Il est possible de distinguer deux types de modélisation, soit par modèle homogène [Arola97], [Arola02] et [Mahdi01], soit par des modélisations plus fines distinguant le comportement de la matrice et des renforts [Rao07a], [Rao07b] et [Santiuste10].

La principale difficulté rencontrée lors de la construction de ces modèles est l'identification des paramètres matériaux (fibre, matrice, interaction fibre-matrice, frottement...) nécessaires à l'obtention de résultats satisfaisants [Mondelin10]. De plus les modèles développés dans la littérature se limitent aux composites à fibres longues pour une orientation de fibres donnée. Toutefois, certains travaux s'intéressent aux matériaux composites présentant des orientations de fibres variables par rapport à la direction d'avance. Dans ce cas, une analyse de la variation des efforts de coupe permet d'identifier l'orientation de fibres rencontrée [Bonnet10].

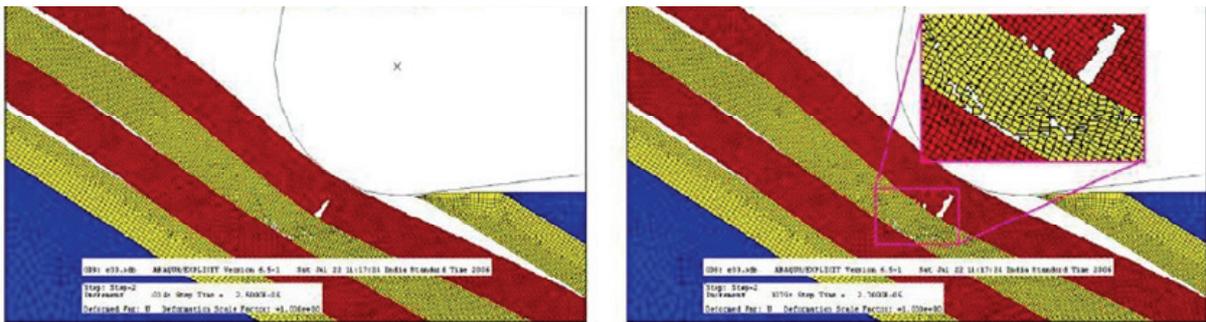


Figure 2-5: modèle éléments finis intégrant les fibres et la matrice [Rao07a]

Toutes ces difficultés font qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de modèles de coupe viables industriellement, il est donc nécessaire d'effectuer des essais de coupe avant toute mise en production [Dessarthe96]. Dans les parties suivantes, une analyse des propriétés remarquables des matériaux composites et l'étude des opérations d'usinage les plus communes permettent de donner des pistes pour la détermination des conditions de coupe.

### 1.2.2. Propriétés physiques particulières et impact sur l'usinabilité

L'analyse des propriétés physiques et mécaniques des composites qui ont une influence directe sur l'usinabilité permet d'émettre des remarques générales sur la coupe des matériaux composites :

- **Hétérogénéité** : Lors de l'usinage des matériaux composites par définition hétérogènes, la matrice et les fibres réagissent différemment. Une des premières conséquences est la décohésion possible de la fibre et de la matrice. En effet, des peluches (fibres non coupées) peuvent apparaître sur la surface usinée et conduire à un état de surface médiocre. Une des actions correctives consiste à conserver la meilleure acuité d'arête possible au cours de l'usinage [Dessarthe96], [Yanming02]. De même, une grande vitesse de coupe et une avance faible sont préconisées pour obtenir une meilleure rugosité [Palanikumar06]. Dans le cas du

perçage, cette décohésion fibre / matrice est caractérisée par le coefficient de délaminage  $F_d = D_{max}/D_o$  (Figure 2-6), qui est le rapport entre le diamètre maximum endommagé et le diamètre du perçage [Yanming02], [Davim05bb]. Dans le cas des fibres d'aramide (plus tenaces), un perçage de 10mm de diamètre avec un outil conventionnel peut conduire à l'obtention d'un trou rendu invisible après retrait du foret à cause des peluches qui recouvrent le trou percé [Dessarthe96].

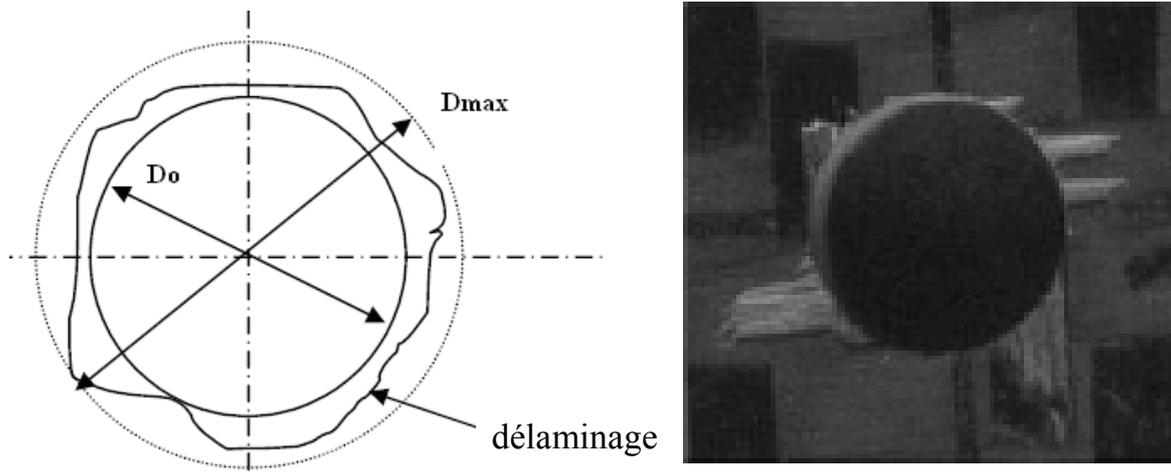


Figure 2-6: coefficient de délaminage [Yanming02]

- **Conductivité thermique :** Les matrices utilisées dans les matériaux composites sont isolantes, la chaleur générée par l'usinage se propage donc difficilement dans la pièce et reste concentrée localement [Dessarthe96]. On peut noter toutefois que les fibres de carbone conduisent mieux la chaleur, les remarques suivantes sont donc à nuancer pour les composites à renfort carbone [Dessarthe96]. Lors de l'usinage, l'échauffement ne doit pas être important pour ne pas dégrader les propriétés mécaniques de la matrice et donc du composite. Les températures critiques sont de l'ordre de 130°C pour les matrices polyamides et 150°C pour les matrices thermodurcissables [Dessarthe96]. La limitation de l'échauffement passe par une limitation du frottement entre l'outil et la pièce, ainsi il est nécessaire d'utiliser des outils ayant une bonne acuité d'arête afin de rendre la coupe des fibres franches [Dessarthe96], [Chardon09a], [Chardon09b]. De plus, l'échauffement de la pièce peut conduire à des dilatations nuisibles au respect des exigences dimensionnelles [Dessarthe96]. Si l'utilisation d'un outil ayant une bonne acuité d'arête ne suffit pas à limiter l'élévation de température, la zone usinée peut alors être refroidie par soufflage d'air comprimé par exemple [Dessarthe96].
- **Anisotropie :** Des pièces composites à fibres longues présentent des renforts dans des directions privilégiées. Ces pièces sont obtenues par empilement de couches de renforts (Figure 2-7). L'usinage coupe les fibres de certaines couches et peut donc amener à des

relâchements de contraintes internes et par la suite à des déformations de la pièce usinée qui nuisent à la qualité dimensionnelle [Dessarthe96], [Ghidossi06].

▪ **Caractère abrasif des fibres :** Dans le cas de l'usinage de composites à fibres de verre et dans une moindre mesure à fibres de carbone, l'usure des outils devient le paramètre prépondérant [Yanming02]. Une usure rapide de l'outil pénalise également l'état de surface obtenu et peut provoquer des échauffements excessifs de la pièce [Dessarthe96], [Yanming02]. Il est alors recommandé d'utiliser de préférence des outils diamantés, pour réduire l'usure et maintenir l'acuité d'arête [Rahman99], [Yanming02], [Chardon10c].

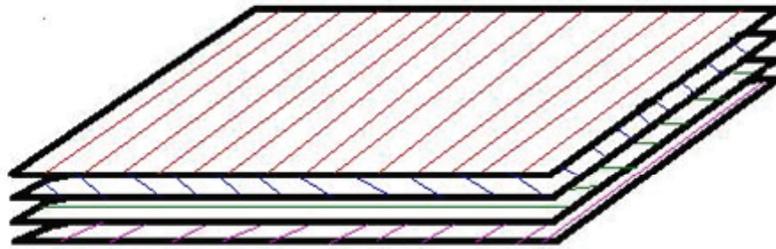


Figure 2-7: empilement de couches d'orientations différentes

Les constructeurs d'outils ont développé des outils principalement dédiés aux opérations de perçage et de fraisage détournage.

### 1.2.3. Perçage des composites

Lors du perçage des composites à renforts tissés, le principal problème est le délaminage des dernières couches [Dessarthe96], qui peut être quantifié par le coefficient  $F_d$  (Figure 2-6), [Sonbaty04], [Davim06], [Gaitonde07]. Ce problème est encore plus important pour les composites à renforts aramides, à cause de la ténacité des fibres. Ainsi, il est recommandé de maintenir à l'aide d'une contre pièce la face où débouchent les trous et de diminuer l'avance lors du débouchage [Dessarthe96].

Les opérations de perçage étant courantes, de nombreux outils ont été développés pour le perçage des matériaux composites. Des géométries spécifiques ont été développées pour le perçage des matériaux avec renforts aramide (Figure 2-8 (a)). Pour les matériaux composites avec renforts en fibre de verre ou de carbone, les géométries employées sont plus conventionnelles (Figure 2-8 (b)). Toutefois, suivant les forets, des pointes sont présentes sur la périphérie de la tête ou encore des têtes peuvent être réalisées avec des angles au sommet variables. Le matériau utilisé pour ces outils est généralement le carbure de tungstène, car il autorise des durées de vie nettement supérieure par rapport à l'acier rapide [Gaitonde07]. Les

outils en carbure de tungstène peuvent être utilisés avec ou sans revêtement, qui permettent d'accroître la durée de vie et de réduire le délaminage en préservant l'acuité d'arête des outils. Un grand nombre de revêtement est proposée par les fabricants, dont des revêtements à base de diamant. Enfin, des arêtes de coupe en diamant polycristallin (PCD) sont également employées pour le perçage des matériaux composites. Elles se présentent sous la forme d'inserts brasés (Figure 2-8 (c)) ou peuvent être générées directement sur le corps d'outil en carbure, nous parlons alors de veined PCD. Les géométries des outils PCD sont sensiblement identiques aux géométries des outils en carbure (Figure 2-8 (b et c)) et présentent une durée de vie élevée, mais le prix est environ trois fois supérieur à celui des outils en carbure de tungstène. De plus, le PCD permet de réaliser des perçages sur des empilages bi ou tri-matériaux (aluminium, CFRP, titane) largement utilisés en aéronautique. Actuellement, compte-tenu de leur prix élevé, l'emploi de PCD reste limité aux applications de perçage d'empilement en aéronautique.

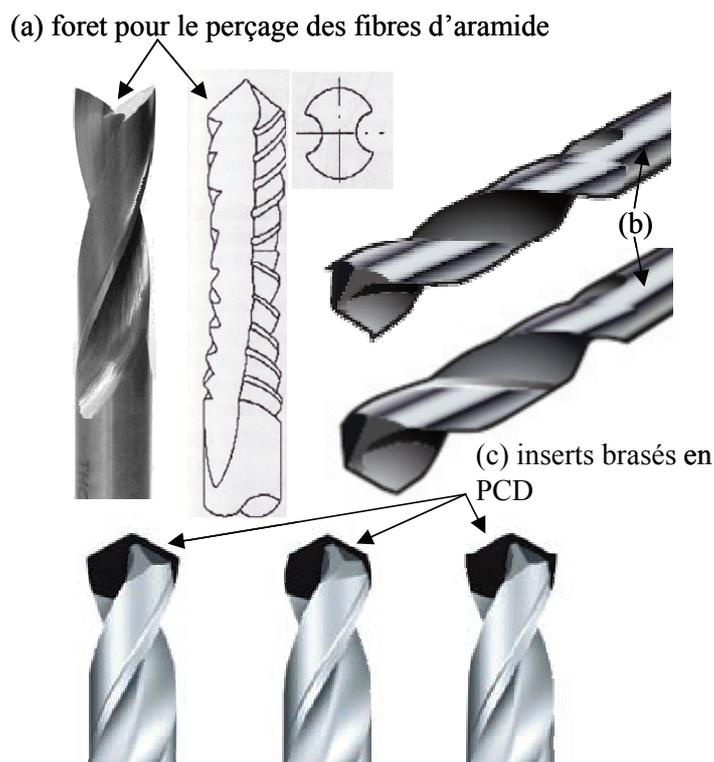


Figure 2-8: outils spécifiques pour le perçage des matériaux composites

#### 1.2.4. Fraisage-détourage des composites

A l'instar du perçage, le fraisage détourage est une opération couramment pratiquée sur les pièces en matériaux composites. En effet, comme il a été observé au chapitre 1, les procédés de mise en forme ne permettent pas toujours d'obtenir une pièce utilisable en l'état.

Une opération de détourage est nécessaire pour éliminer la bavure en périphérie et produire des bords présentant une qualité satisfaisante pour les assemblages. Ces opérations étant très répandues, de nombreux constructeurs ont développé des outils spécifiques. L'objectif est d'obtenir un bord coupé le plus propre possible (sans délaminage et fibres non coupées) avec une productivité élevée. Les constructeurs d'outils proposent diverses solutions en carbure de tungstène monobloc (Figure 2-9 (a)). Comme pour le perçage, des géométries spécifiques sont développés pour les fibres d'aramide plus tenaces. Dans la plupart des cas, les outils carbure sont revêtus d'un revêtement diamant qui améliore la durée de vie. D'autre part, malgré un prix élevé, des outils à inserts PCD brasés peuvent être employés pour le détourage (Figure 2-9 (b)). Enfin, il est également possible d'utiliser des outils à concrétions diamantées (Figure 2-9 (c)). Ces outils n'ont pas d'arêtes de coupe définies et sont proches des outils d'abrasion tels que les meules de rectification. Ces outils sont obtenus par un procédé de dépose électrolytique de grains de diamant. La productivité et la qualité obtenue avec cette technologie sont fortement dépendantes de la granulométrie des grains de diamants. Ces outils présentent un coût inférieur à une solution PCD et offrent des performances intéressantes. Cette technologie d'usinage de composite par abrasion est étudiée au Chapitre 3.

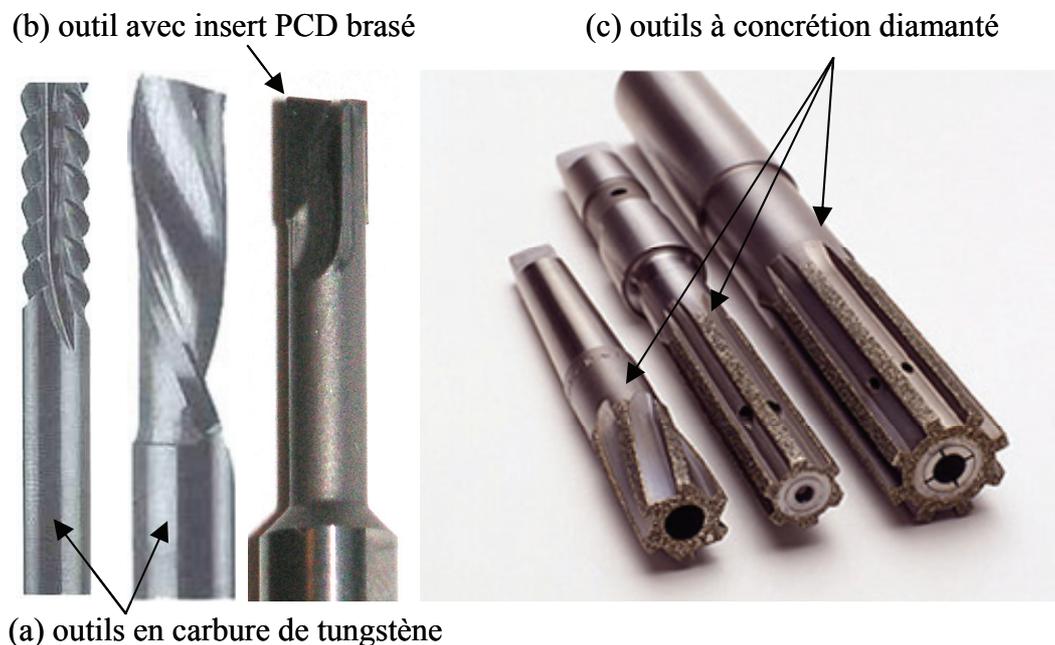


Figure 2-9: outils spécifiques pour le fraisage-détourage des matériaux composites

### 1.2.5. Procédés alternatifs à l'usinage

L'obtention des préformes des composites induit des surplus de matière (bavures) à retirer. Pour cela, dans certains cas, il existe des méthodes alternatives à l'usinage [Reyne98] :

- **Les couteaux à mouvement alternatif**, dits Gerber® : des lames dotées d'un mouvement alternatif (jusqu'à 5000 battements/min) cisailent la bavure.
- **Le laser**, son intérêt réside dans la grande vitesse d'avance permise (15 à 40m/min) et sa facilité d'automatisation permettant de réaliser, avec précision, des formes complexes. Mais la découpe laser provoque une élévation locale de température qui peut endommager le matériau et provoquer l'émanation de gaz toxiques, voire des incendies.
- **Le jet d'eau hyperbare** : l'absence de chauffage est ici appréciée par rapport au laser, et le coût d'utilisation est réduit de 50%. La vitesse d'avance est fonction de l'épaisseur à découper (1 à 75m/min). Cependant ce procédé, génère un taux d'humidité important aux alentours, même s'il ne « mouille » pas la matière. Il est donc nécessaire de prendre des précautions pour certaines matrices comme le polyamide, qui sont sensibles à l'humidité [Dessarthe96]. Ce procédé connaît une évolution rapide et tend à se généraliser [Dessarthe96]. Cependant, ce procédé peut aussi générer des problèmes de délaminage [Shanmugan08] (Figure 2-10).

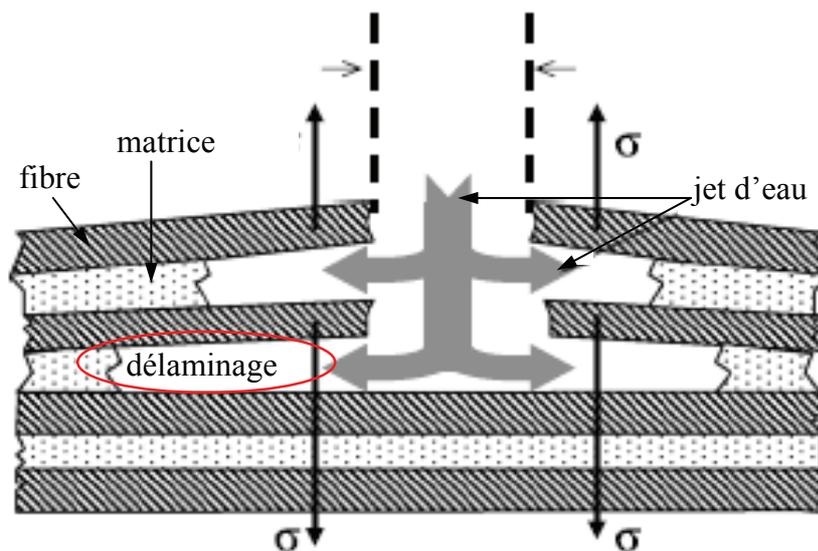


Figure 2-10: mécanisme de délaminage lors de la découpe jet d'eau [Shanmugan08]

Ces deux derniers procédés permettent de réaliser des perçages, cependant ils génèrent un angle de dépouille sur le flanc coupé qui peut être rédhibitoire pour certaines applications [Dessarthe96]. Enfin, ces solutions alternatives nécessitent un investissement important, et ne peuvent pas être appliquées pour des géométries de pièces particulières ou des épaisseurs trop importantes (au-delà de 10 mm). Pour toutes ces raisons, l'usinage doit encore être employé dans certains cas malgré les difficultés qu'il comporte.

### 1.2.6. Cas de l'usinage de forme

Les parties précédentes montrent que le niveau d'expertise sur les opérations de perçage et de détournage de matériaux composites est important même s'il n'est pas encore comparable à celui de l'usinage des matériaux métalliques. L'expertise est encore plus faible pour l'usinage de forme des matériaux composites. En effet, les exemples d'application d'usinage de forme de matériaux composites sont rares. Il existe toutefois quelques cas où un travail sur les bords de pièce est nécessaire pour l'assemblage, notamment sur des caissons d'aile en aéronautique. Les outils dédiés à ces opérations ont fait l'objet de développement plus limités de la part des fabricants d'outils que dans les cas du perçage et du fraisage-détournage. Ils sont fréquemment fabriqués à base de PCD car il permet d'obtenir les efforts de coupe les plus faibles et un meilleur état de surface que les outils en carbure de tungstène revêtus ou non [Davim05a], [Davim05b], [Palanikumar08], [Petropoulos08], [Davim09], car la tenue à l'usure est moindre et l'acuité d'arête diminue rapidement [Chardon09b]. Ainsi, la qualité d'état de surface obtenue étant fortement liée à l'acuité d'arête, leur emploi est à éviter pour des applications où l'état de surface est un critère prépondérant comme l'usinage de moule en Hextool™ [Chardon10c].

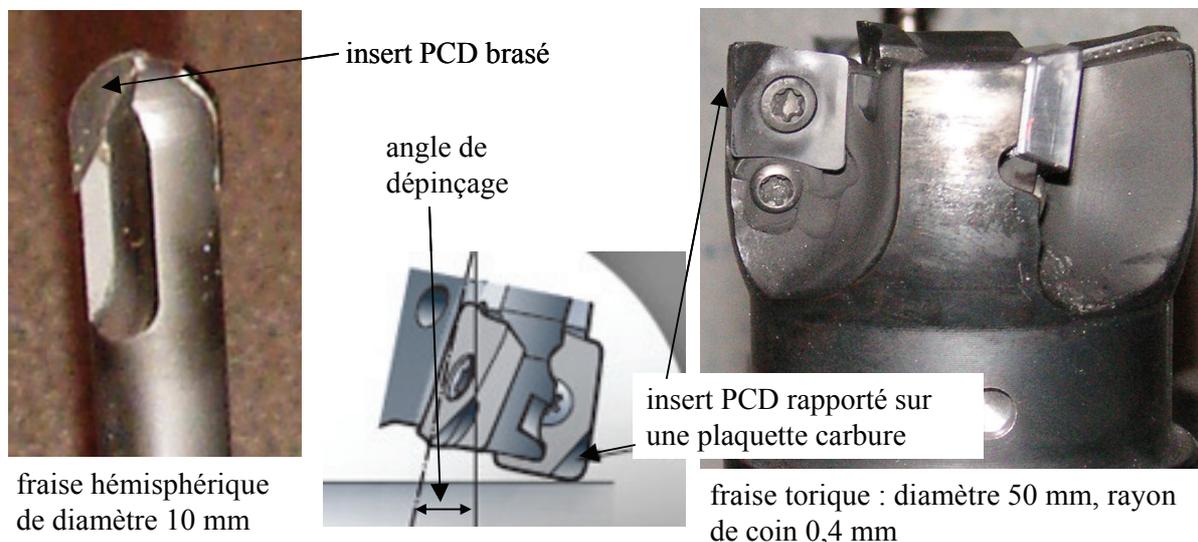


Figure 2-11: outils PCD pour le fraisage de forme de matériaux composites

Les outils PCD hémisphérique et torique utilisés dans notre étude pour l'usinage de l'Hextool™ apparaissent sur la Figure 2-11. L'insert PCD est brasé directement sur le corps d'outil en carbure ou sur une plaquette carbure. Le rayon de coin de l'insert peut prendre diverses valeurs permettant d'obtenir une fraise droite ou torique. Ces outils peuvent alors être

utilisés avec un angle de dépinçage pour usiner des formes gauches. Le choix d'une géométrie d'outil hémisphérique ou torique est discuté dans le chapitre 4.

Un des objectifs de notre étude étant de minimiser la rugosité générée par usinage afin de faciliter le polissage manuel [Lee06], il est essentiel de maîtriser les motifs laissés par ces outils sur la surface usinée.

## 2. Motif laissé par l'outil sur la pièce usinée

Dans le cas de l'usinage d'un moule par balayage avec un outil hémisphérique ou torique, un motif particulier (Figure 2-12) est généré par le mouvement de l'outil sur la pièce [Lin96], [Quinsat08]. Un calcul géométrique permet de déterminer la hauteur de crête et la rugosité arithmétique théorique résultante perpendiculairement à la direction d'avance et également suivant la direction d'avance.

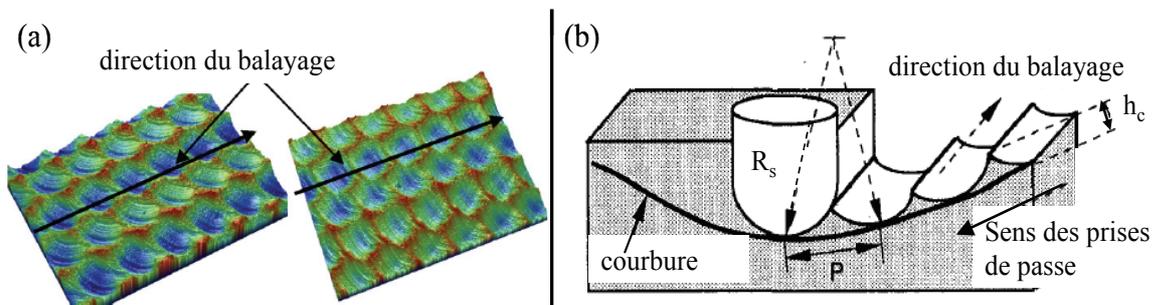


Figure 2-12: (a) motif mesuré sur une surface usinée en aluminium [Quinsat08] ; (b) motif laissé sur une surface concave par une fraise hémisphérique [Lin96]

### 2.1. Calcul de la rugosité arithmétique théorique

Pour une surface concave, la hauteur de crête théorique  $h_c$  est obtenue par l'équation (1) avec  $R_s$  le rayon de courbure local de la surface nominale,  $R_{eff}$  le rayon effectif de coupe et  $a_e$  la prise de passe radiale (Figure 2-12 (b)) [Lin96].

$$h_c = R_s - (R_s + R_{eff}) \sqrt{1 - \left(\frac{a_e}{2R_s}\right)^2} - \sqrt{R_{eff}^2 - \left(\frac{(R_s + R_{eff})a_e}{2R_s}\right)^2} \quad (1)$$

Pour une surface plane, l'équation (1) peut être remplacée par l'équation (2) avec  $a_e$  la prise de passe radiale, le rayon de courbure local  $R_s$  étant infini. Par la suite, la rugosité arithmétique théorique est obtenue avec l'équation (3) [Grzesik96].

$$h_c = \frac{a_e^2}{8R_{eff}} \quad (2)$$

$$R_a = \frac{a_e^2}{18\sqrt{3}R_{eff}} \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) permettent d'obtenir la hauteur de crête et la rugosité arithmétique  $R_a$  théorique perpendiculairement à la direction d'avance. Toutefois, il est possible de les calculer suivant la direction d'avance, en remplaçant la prise de passe radiale  $a_e$  par l'avance à la dent  $f_z$ . Les équations (4) et (5) permettent d'obtenir la hauteur de crête  $h_{cf}$  et la rugosité arithmétique  $R_{af}$  théorique suivant à la direction d'avance.

$$h_{cf} = \frac{f_z^2}{8R_{eff}} \quad (4)$$

$$R_{af} = \frac{f_z^2}{18\sqrt{3}R_{eff}} \quad (5)$$

Quelque soit la direction d'observation, la hauteur de crête et la rugosité arithmétique théoriques sont fonction du rayon effectif de coupe  $R_{eff}$ . Dans le cas d'un outil hémisphérique, le rayon effectif de coupe est directement égal au rayon de l'outil. En revanche, dans le cas d'une fraise torique, le rayon effectif de coupe ne correspond pas directement au rayon de l'outil. En effet, pour usiner une forme gauche avec ce type d'outil, des angles de dépinçage latéraux et longitudinaux (respectivement  $\theta_n$  et  $\theta_t$ ) sont nécessaires. Le rayon effectif de coupe devient une ellipse (Figure 2-13). Il est à noter que ces angles de dépinçage peuvent également être utilisés avec un outil hémisphérique, pour éviter les interférences et une vitesse de coupe nulle en bout d'outil [Bouzakis03].

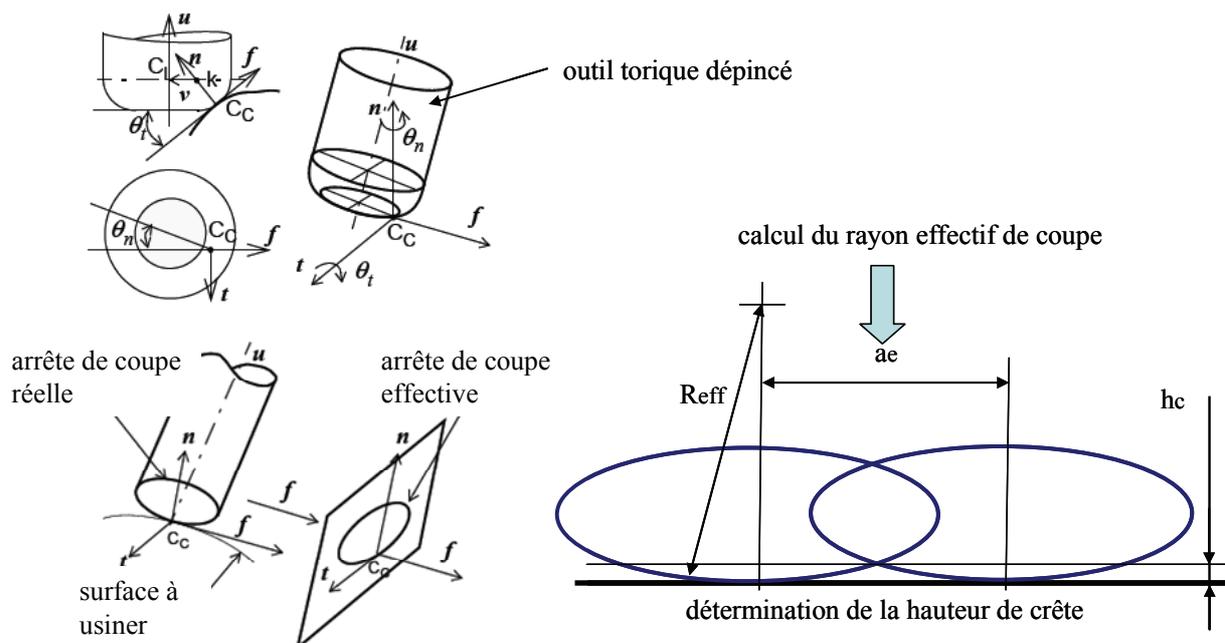


Figure 2-13: hauteur de crête théorique [Tournier01], [Tournier05]

Au point de contact entre l'outil et la surface à usiner, le rayon effectif de coupe  $R_{eff}$  est obtenu par l'équation (6), avec  $R$  le rayon de l'outil et  $r$  le rayon de coin de l'outil [Tournier01], [Tournier05].

$$R_{eff} = \frac{r(R + r \sin(\theta_t))}{r \sin(\theta_t) \cos(\theta_n^2) + (R + r \sin(\theta_t)) \sin(\theta_n^2)} \quad (6)$$

Comme le montre la figure suivante (Figure 2-14), ce modèle est proche de la valeur théorique calculée numériquement en prenant en compte la forme elliptique de la trace laissée par l'outil. L'erreur reste inférieure à 10 % pour un outil de diamètre supérieur 10 mm, lorsque le  $R_a$  visé est inférieur à 2  $\mu\text{m}$ . En effet, pour un  $R_a$  donné, la diminution de l'angle de dépinçage engendre une augmentation du pas et par conséquent un écart plus important entre le profil elliptique et le modèle.

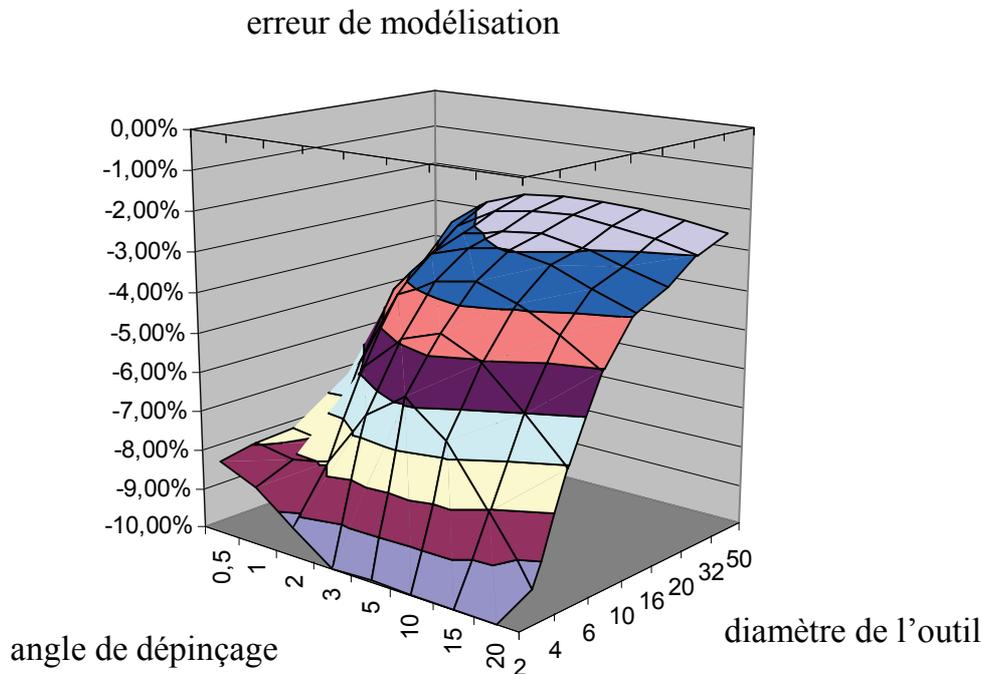


Figure 2-14: erreur de modélisation de la rugosité théorique

Dans le cas d'un matériau métallique homogène, les résultats obtenus avec ce type de modèle analytique de rugosité théorique sont proches des rugosités obtenues expérimentalement [Jung05]. Afin de valider ce résultat et d'effectuer une comparaison entre un matériau métallique et l'Hextool™, une étude expérimentale est conduite.

## 2.2. Etablissement d'un essai de référence dans l'aluminium

Afin de comparer le motif laissé par l'usinage dans un matériau métallique et l'Hextool™, une première pièce de référence est usinée en aluminium.

**2.2.1. Trajectoires d'usinage et conditions de coupe**

Un essai de balayage avec des prises de passe radiale  $a_e$  variables est alors mené dans un alliage d'aluminium de nuance 2017. La prise de passe radiale varie de 0,1 à 1 mm par incrément de 0,1 mm, pour obtenir les valeurs de hauteur de crête et de rugosité arithmétique théorique suivantes (Tableau 2-4).

<b><math>a_e</math> (mm)</b>	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
<b><math>R_a</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	6,42	5,20	4,11	3,14	2,31	1,60	1,03	0,58	0,26	0,06
<b><math>h_c</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	25,00	20,25	16,00	12,25	9,00	6,25	4,00	2,25	1,00	0,25

Tableau 2-4: rugosité arithmétique et hauteur de crête théoriques

Les essais sont menés avec une fraise hémisphérique en carbure monobloc (Sandvik R216.32) de 10 mm de diamètre (Figure 2-15 (a)), selon les conditions de coupe du Tableau 2-5, sur le centre d'usinage 5 axes Huron KX15 sous arrosage à l'huile soluble.

<b>Outil</b>	<b>Dépinçage latéral (<math>^\circ</math>)</b>	<b><math>V_c</math> (m/min)</b>	<b><math>f_z</math> (mm/tr/z)</b>	<b><math>a_p</math> (mm)</b>	<b><math>V_f</math> (mm/min)</b>	<b>N (tr/min)</b>
<b>Fraise boule en carbure</b>	10 / 5	500	0,1	0,1	3200	16000

Tableau 2-5: conditions de coupe de finition pour la fraise hémisphérique

Deux essais de balayage sont conduits (Figure 2-15 (b et c)). Dix zones de 10x50 mm, correspondant aux dix valeurs de  $a_e$  données dans le Tableau 2-4, sont usinées avec deux angles de dépinçage latéral différents (5 et 10 $^\circ$ ), pour ne pas générer une vitesse de coupe nulle au point générateur [Bouzakis03]. Ces deux valeurs sont plausibles dans le cas de l'usinage d'un moule industriel. La valeur d'avance à la dent choisie correspond à la valeur la plus faible de prise de passe radiale, afin de limiter son influence sur la rugosité obtenue.

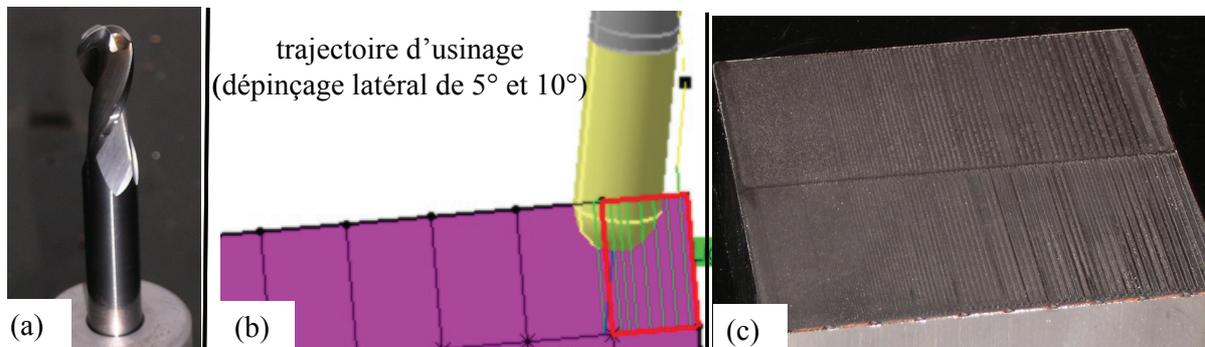


Figure 2-15: (a) fraise hémisphérique ; (b) géométrie et trajectoire d'usinage ; (c) pièce usinée

### 2.2.2. Matériel et paramètres de mesure de rugosité

Des mesures de rugosité sont réalisées sur les vingt zones usinées à l'aide d'un rugosimètre Mitutoyo Surftest SV 500 (Figure 2-16). Les réglages du rugosimètre sont effectués en accord avec la norme ISO 4288 :

- Le rayon de la pointe de palpation en diamant vaut  $2\mu\text{m}$ .
- La vitesse de balayage est de  $0,2\text{mm/s}$ .
- Utilisation d'un filtre 2CRPC75.
- La longueur de base de rugosité employée est de  $0,8\text{ mm}$  ou  $2,5\text{mm}$ .
- La longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  est respectivement fixée à  $0,8\text{ mm}$  ou  $2,5\text{ mm}$ , en accord avec la longueur de base de rugosité.



*Figure 2-16: rugosimètre Mitutoyo Surftest SV500*

Les longueurs de base de rugosité et les longueurs d'onde de coupure ne sont pas identiques pour les vingt zones usinées. Selon la norme, ces valeurs doivent être fixées en fonction de la rugosité de la pièce, qui n'est pas uniforme dans cet essai et les valeurs obtenues se situent sur deux plages de réglages. Une longueur de base de rugosité et une longueur d'onde de coupure sont choisies à  $0,8\text{ mm}$  pour les valeurs de rugosité arithmétique effectives inférieures à  $2\mu\text{m}$ , et à  $2,5\text{ mm}$  dans le cas contraire.

### 2.2.3. Résultats et commentaires

Les mesures sont effectuées dans une direction perpendiculaire à la direction d'avance. Quelques mesures sont aussi prises suivant la direction d'avance afin de constater d'éventuelles variations sur la rugosité bien que l'avance à la dent soit constante. La Figure

2-17 illustre la variation des valeurs de rugosité mesurées en fonction de  $a_e$  pour la zone usinée avec un angle de dépinçage latérale de  $5^\circ$ . Pour chaque zone usinée, cinq mesures de rugosité sont effectuées dans la direction perpendiculaire à la direction d'avance. Nous pouvons alors constater que la dispersion sur la rugosité arithmétique est de l'ordre de  $0,3 \mu\text{m}$ .

La courbe de rugosité expérimentale moyenne est très proche de la courbe de rugosité théorique (écart inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$ ). Ce résultat valide le modèle analytique de rugosité arithmétique et est en accord avec la bibliographie [Jung05]. Toutefois, la rugosité obtenue expérimentalement diffère du modèle pour des valeurs de prise de passe radiale inférieures à  $0,2 \text{ mm}$ . Dans ce cas, la limite de rugosité arithmétique accessible pour ce couple outil / matière sur cette machine outil est  $0,2 \mu\text{m}$ . Cette limitation peut s'expliquer par des phénomènes de faux rond, de copeau minimum ou encore de vibrations [Yuan96], [Paris04], [Lai08].

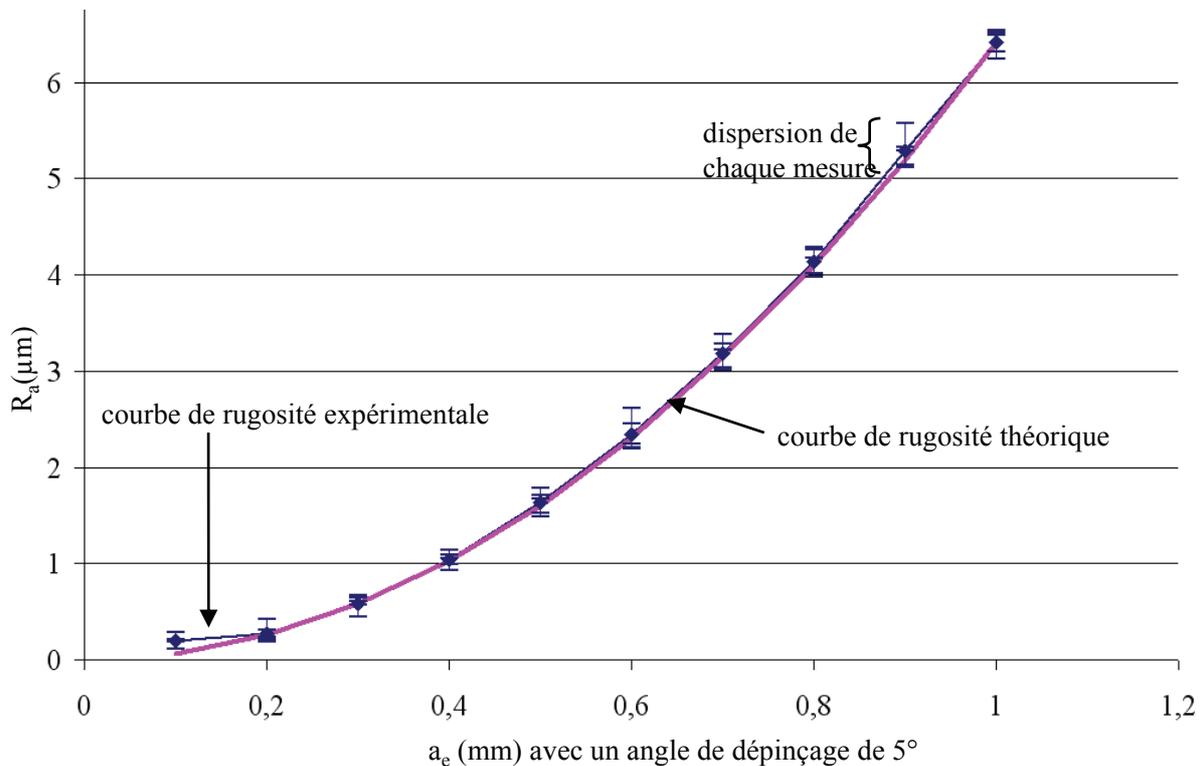


Figure 2-17: comparaison entre rugosités théoriques et expérimentales pour un angle de dépinçage de  $5^\circ$  dans l'aluminium

Pour les matériaux composites, les phénomènes de coupe mis en jeu sont fondamentalement différents de ceux observés dans les matériaux métalliques homogènes [Rao07a]. Compte tenu de l'hétérogénéité intrinsèque aux matériaux composites, des arrachements observés lors de leur usinage [Palanikumar06] et des résultats expérimentaux obtenus au préalable dans l'Hextool™ [Chardon09b], il apparaît qu'une valeur minimale de

rugosité accessible existe. La valeur de prise de passe radiale associée représente alors une valeur optimisant le ratio qualité de surface / temps d'usinage, utile pour la spécification d'une gamme de fabrication productive d'un moule en matériaux composites.

### 3. Mise en évidence d'un seuil de rugosité pour l'Hextool™

Afin de mettre en évidence l'apparition d'un seuil de rugosité accessible lors de l'usinage de finition d'un moule en Hextool™ et de déterminer la valeur de prise de passe radiale optimale lui correspondant, le protocole expérimental suivant est mise en œuvre.

#### 3.1. Trajectoires d'usinage et conditions de coupe

Pour étudier l'influence de la prise de passe radiale sur la qualité de surface atteinte dans l'Hextool™, des usinages de finition par balayage sont menés (Figure 2-18). Les trajectoires employées sont du même type que celles utilisées pour réaliser la pièce en aluminium. Dix zones de 10x50 mm sont alors usinées avec une fraise hémisphérique en PCD de diamètre 10 mm (Figure 2-18 (a)) et sept zones de 15x65 mm sont de plus usinées avec une fraise torique en PCD de diamètre 16 mm et présentant un rayon de coin de 0,4 mm (fraise Sandvik R390, Figure 2-18 (b)).

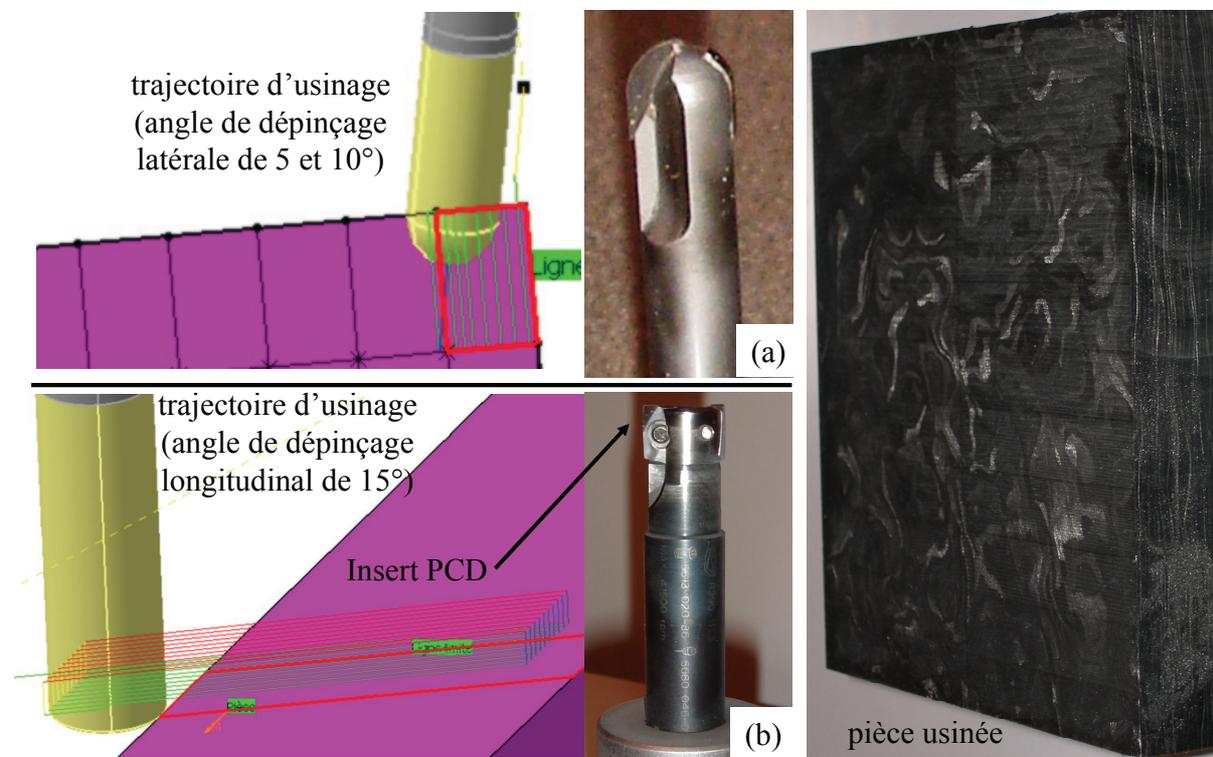


Figure 2-18: trajectoires d'usinage, outils, et pièce usinée

Des outils PCD sont utilisés du fait de leurs meilleures performances, notamment en termes de rugosité arithmétique produite, que les outils en carbure [Davim05a], [Davim05b]. Différentes valeurs de prise de passe radiale sont testées (Tableau 2-4) avec différents angles de dépinçage. Pour la fraise hémisphérique, deux angles de dépinçage latérale de 5 et 10° sont testés pour garantir une vitesse de coupe non nulle au niveau du point générateur [Bouzakis03]. Pour la fraise torique, un angle de dépinçage longitudinal de 15° est employé afin de pouvoir observer un motif de type crête sur la surface usinée. En effet, un angle de dépinçage plus faible aurait « couché » l'outil sur la pièce et empêcher d'identifier le profil sous la forme de portions d'ellipse, propre à une mesure de rugosité. Le passage de l'outil n'aurait plus induit un défaut de rugosité, mais un défaut d'ondulation. L'ensemble de ces valeurs angulaires sont compatibles avec la géométrie des moules industriels.

Ces essais sont conduits sans arrosage sur un centre d'usinage 5 axes (Huron KX15). Les échantillons d'HexTool™ sont préalablement surfacés en laissant une surépaisseur de 0,5 mm correspondant à la prise de passe axiale  $a_p$  envisagée. Les conditions de coupe employées sont celles du Tableau 2-6. Pour le PCD les vitesses de coupe préconisées par les constructeurs d'outils sont de 1200 m/min, ici les vitesses sont limitées par la fréquence de rotation maximale de la broche.

Outil	Dépinçage (°)	$V_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/tr/z)	$a_p$ (mm)	$V_f$ (mm/min)	N (tr/min)
Fraise boule PCD	10 ou 5	500	0,1	0,5	3200	16000
Fraise droite PCD	15	800	0,1	0,5	3200	16000

Tableau 2-6: conditions de coupe en finition

Pour chaque zone usinée, dix mesures de rugosité sont réalisées perpendiculairement à la direction d'avance. Les réglages du rugosimètre sont identiques à ceux décrits dans la partie précédente (Chapitre 2, §2.2.2) et sont en accord avec la norme ISO 4288. De plus, les résultats de rugosité arithmétique obtenus avec le rugosimètre sont validés par des mesures pratiquées avec un profilomètre 3D (Figure 2-23 (a et b)). La comparaison des essais et du modèle théorique, pour des conditions d'usinage proches de celles employées dans l'aluminium et des moyens de mesure identiques, permet d'observer l'influence du matériau composite sur la qualité de surface obtenue.

### 3.2. Analyse des résultats

La dispersion sur la rugosité arithmétique obtenue expérimentalement est de 1 à 2  $\mu\text{m}$  (Figure 2-19, Figure 2-20 et Figure 2-21). Cette dispersion, importante pour l'Hextool™ comparée à celle observée dans l'aluminium, peut s'expliquer par le caractère hétérogène du matériau et également par la différence de son comportement durant l'usinage. En effet, les mécanismes de coupe pour ces matériaux dépendent largement de l'orientation des fibres par rapport à la direction d'usinage [Rao07]. Or, nous avons vu lors de sa description que l'orientation des fibres dans le plan de dépose de l'Hextool™ est quasi-isotrope.

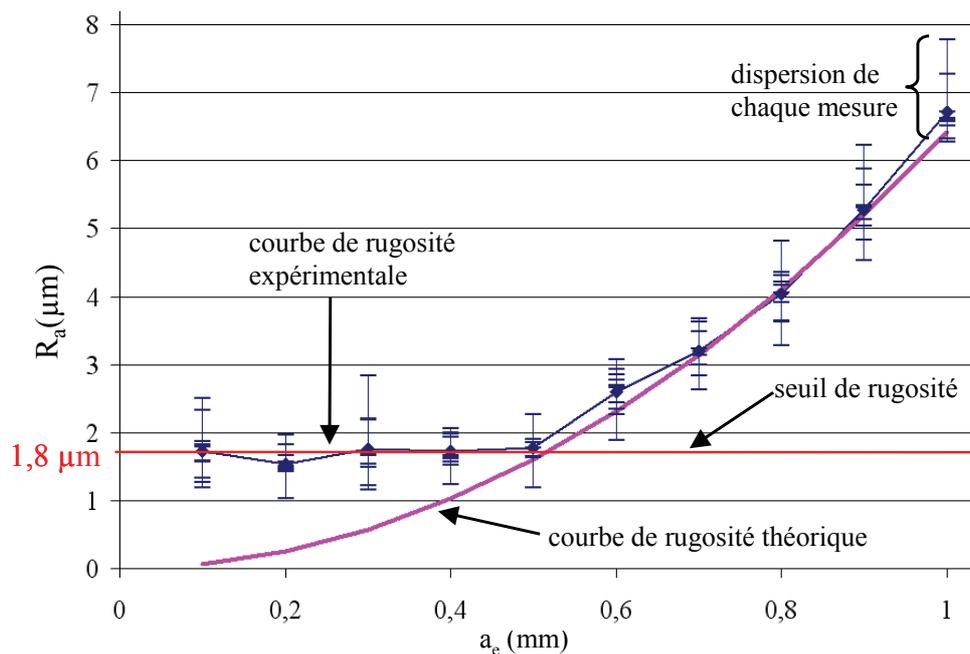


Figure 2-19: comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise boule PCD, angle de dépinçage de 5°) dans l'Hextool™

Les Figure 2-19 et Figure 2-20 montrent la bonne corrélation entre les valeurs de rugosité théorique et expérimentale pour des valeurs de prise de passe radiale  $a_e$  supérieures à 0,6 mm. Pour des valeurs inférieures à 0,5 mm, la rugosité arithmétique est sensiblement constante aux alentours de 1,8  $\mu\text{m}$ , qui représente la rugosité arithmétique minimale pouvant être atteinte pour ce couple fraise boule PCD / Hextool™. Nous parlerons alors de seuil de rugosité. Par conséquent, une valeur de prise de passe radiale inférieure à 0,5 mm ne permet pas d'améliorer la rugosité obtenue. Cette valeur optimise le ratio rugosité / temps d'usinage pour ce couple outil / matière.

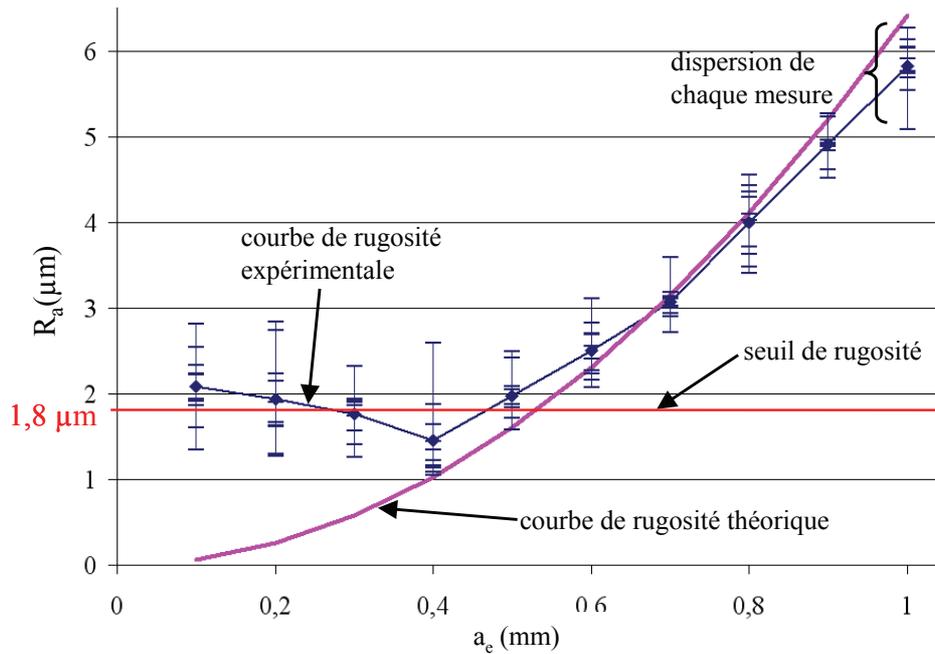


Figure 2-20: comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise boule PCD, angle de dépinçage de  $10^\circ$ ) dans l'Hextool™

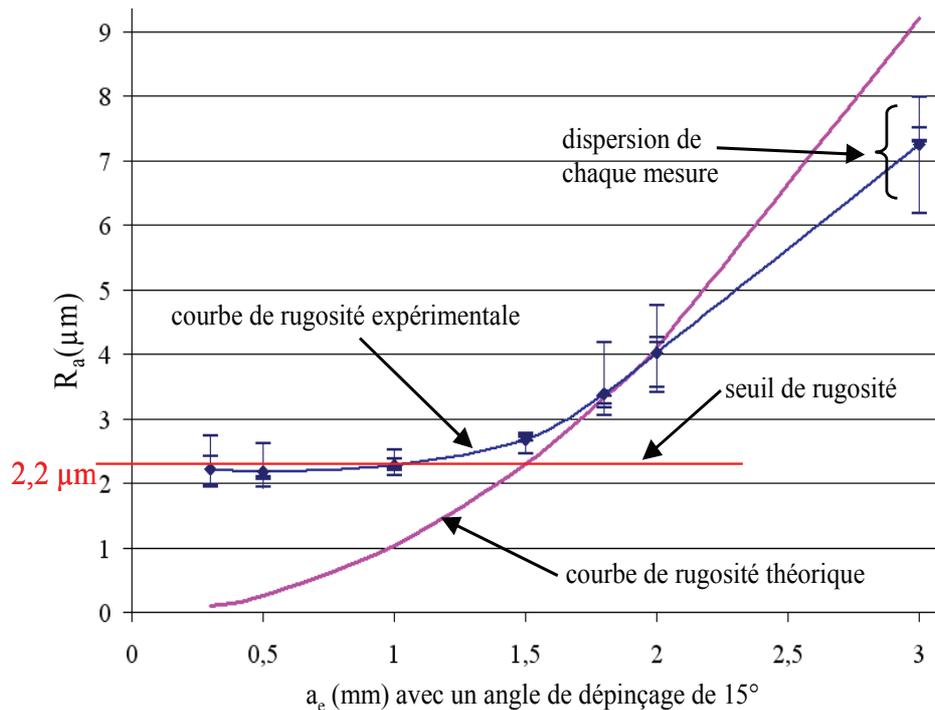


Figure 2-21: Comparaison entre rugosité arithmétique théorique et expérimentale (fraise torique PCD, angle de dépinçage de  $15^\circ$ ) dans l'Hextool™

Dans le cas d'un outil torique en PCD, un seuil de rugosité apparaît également pour des valeurs de  $a_e$  inférieures à 1 mm (Figure 2-21). Cette valeur est alors une valeur optimale de prise de passe radiale pour ce couple outil matière. De plus, nous remarquons que pour des valeurs de  $a_e$  supérieure à 2 mm, la rugosité moyenne expérimentale s'éloigne des valeurs

théoriques (Figure 2-21). Dans ce cas, la période des motifs laissés par l'outil sur la pièce ( $\geq 2$  mm) est de l'ordre de la longueur de base d'évaluation du défaut de rugosité qui vaut 2,5 mm. Une partie du motif est filtrée par le rugosimètre qui l'interprète comme un défaut d'ondulation. Ceci engendre une rugosité mesurée plus faible que la valeur théorique.

Afin de valider le phénomène de seuil de rugosité sur une géométrie non plane, une empreinte cylindrique est usinée avec la fraise torique en PCD par balayage en plans parallèles avec un angle de dépinçage longitudinal de  $15^\circ$  et une prise de passe radiale de 0,1 mm (Figure 2-22). La machine et les conditions d'usinage sont identiques aux essais précédents menés avec la fraise torique. Les mesures de rugosité arithmétique effectuées sur la pièce ont une valeur moyenne de  $2,2 \mu\text{m}$ , largement supérieure à la valeur théorique et correspondant à la valeur du seuil pour ce couple outil / matière. Le phénomène de seuil de rugosité est donc indépendant de la géométrie usinée et doit sans aucun doute apparaître sur une géométrie réelle de moule.

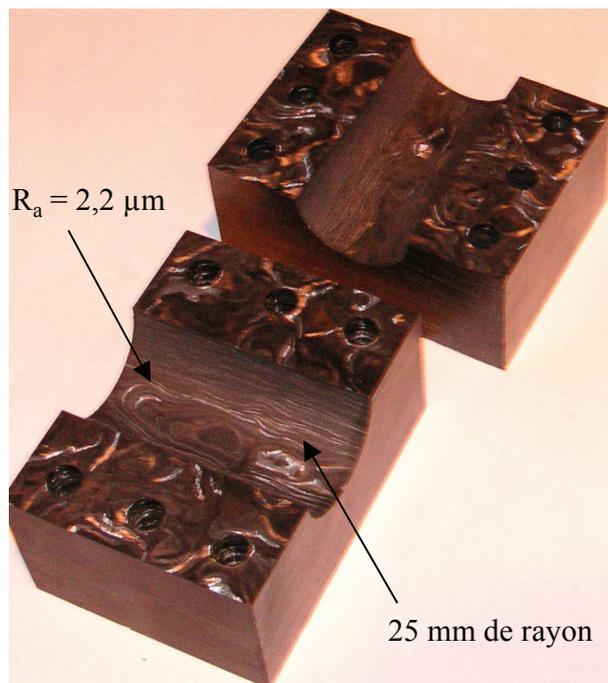


Figure 2-22: empreinte cylindrique usinée avec une fraise torique en PCD,  $a_p = 0,1$  mm et  $\theta_t = 15^\circ$

Nous pouvons remarquer que la valeur du seuil de rugosité est de  $1,8 \mu\text{m}$  pour la fraise hémisphérique alors qu'elle vaut  $2,2 \mu\text{m}$  pour la fraise torique. La valeur du seuil de rugosité dépend donc de l'outil utilisé. De plus, ce phénomène de seuil n'apparaît pas lors de l'usinage d'un alliage d'aluminium alors que les conditions d'usinage sont identiques. Ce phénomène est donc une particularité liée aux mécanismes de coupe spécifiques rencontrés lors de l'usinage des matériaux composites. La prise d'images au microscope électronique à balayage

(MEB) et avec un profilomètre 3D (capteur STIL du laboratoire I2M à Bordeaux) sont réalisées pour comprendre les comportements spécifiques qui conduisent à l'apparition de ce seuil.

La Figure 2-23 (a) et (c) montre une surface usinée avec une fraise hémisphérique en PCD, une prise de passe radiale de 0,1 mm et un angle de dépinçage latéral de 5°. Sur l'image (c) prise au MEB, des fibres cassées (diamètre de fibre 7 µm) et arrachées apparaissent. Ces arrachements sont inhérents à l'usinage de matériaux composites et sont à l'origine de la limitation sur la qualité de surface produite [Rao07]. De même, la Figure 2-23 (b) et (d) montrent des arrachements de matière sur la surface usinée et les crêtes laissées par l'opération de balayage ( $a_e = 1$  mm) apparaissent. Le seuil de rugosité est atteint, lorsque la hauteur de crête proche de la profondeur des arrachements. Pour ce couple outil / matière, le seuil de 1,8 µm apparaît pour  $a_e = 0,5$  mm ce qui correspond à une hauteur de crête théorique de 6,25 µm (Tableau 2-4). Nous constatons sur la Figure 2-23 (c) que la profondeur des arrachements est de l'ordre du diamètre de la fibre de carbone, soit 7 µm.

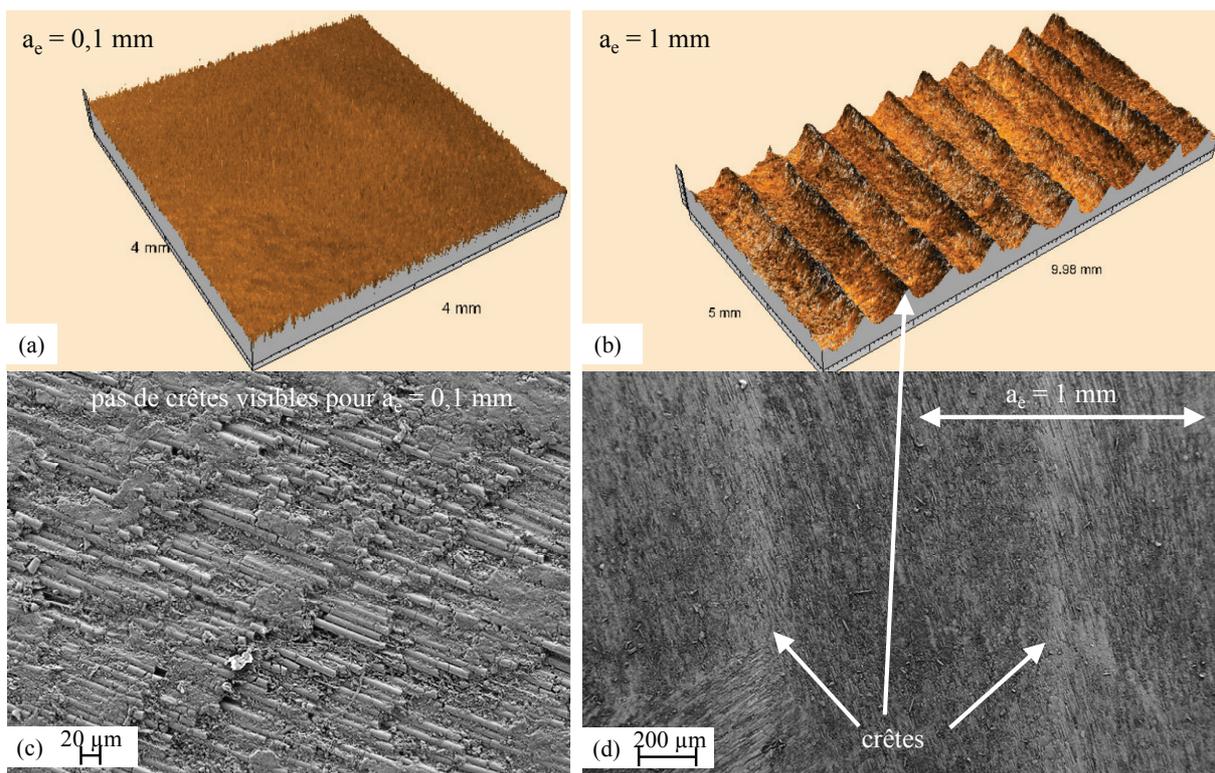


Figure 2-23: images des surfaces usinées dans l'HexTool™ avec un outil hémisphérique de  $\phi 10$  mm prises au profilomètre (a et b) et au MEB (c et d)

Le seuil de rugosité pour l'outil torique est de 2,2 µm alors qu'il est de 1,8 µm pour l'outil hémisphérique. Cette différence s'explique par la qualité de la coupe et plus

précisément par la profondeur des arrachements générés. En effet même si dans les deux cas l'outil est en PCD et le matériau usiné est l'Hextool™, la géométrie de l'outil, la section de copeaux et la vitesse de coupe sont différentes (Figure 2-24).

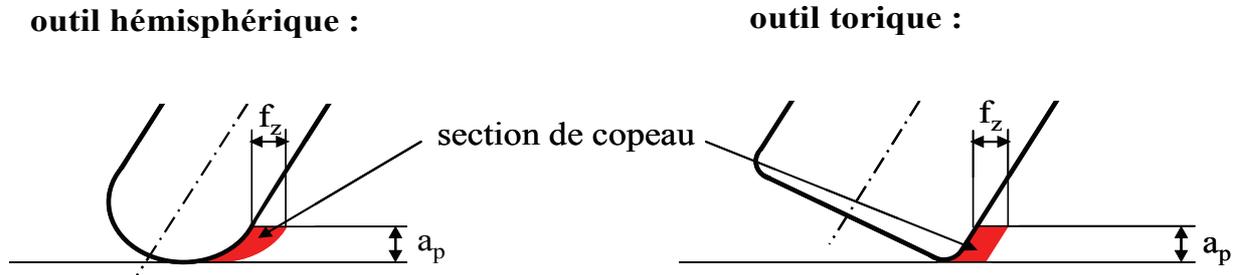


Figure 2-24: section de copeau suivant la géométrie de l'outil

Les arrachements de matière générés par l'opération de finition peuvent alors varier suivant l'outil utilisé. La géométrie de l'outil et son orientation ont donc un impact sur la valeur du seuil de rugosité. Pour l'illustrer, des essais de surfacage menés avec la fraise torique, équipée d'une plaquette racleuse et ayant un angle de dépinçage nul ont produit un seuil de rugosité de  $1,2 \mu\text{m}$ , alors qu'il devrait être théoriquement nul. L'hétérogénéité du matériau ne permet de s'approcher de cette valeur théorique.

#### 4. Conclusion

Ces travaux mettent en évidence l'apparition d'une valeur minimale de rugosité accessible lors d'une opération de balayage par plans parallèles avec des outils hémisphérique et torique. La valeur de rugosité du seuil et la prise de passe radiale associée dépendent des conditions d'usinage, du couple outil / matière et de l'orientation de l'outil par rapport à la pièce. Ce phénomène, lié aux arrachements générés lors de la coupe, pourrait sans doute être généralisé à l'ensemble des matériaux composites.

De plus, cette étude permet d'identifier une valeur de prise de passe radiale optimale pour ce couple outil / matière. En effet, le meilleur ratio rugosité / temps d'usinage est atteint lorsque la valeur du seuil de rugosité est atteinte. Cette information est essentielle pour la mise en place d'une gamme de fabrication productive.

Cependant, les valeurs de rugosité arithmétique obtenues avec les fraises en PCD sont supérieures aux attentes industrielles de qualité de surface pour les moules en Hextool™ ( $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ ). La finition par outil coupant ne permet donc pas d'atteindre l'exigence d'état de surface nécessaire à l'utilisation du moule pour les procédés RTM et une opération de

polissage manuelle demeure indispensable. Afin d'augmenter la productivité, le prochain chapitre s'intéresse à l'automatisation du procédé de meulage sur une machine outil à commande numérique.



## Chapitre 3 Finition avec outil abrasif

Les travaux menés sur l'usinage de finition avec des outils à géométrie définie en carbure ou en PCD montrent qu'il est impossible d'atteindre les exigences de qualité de surface nécessaire aux moules en Hextool™ employés pour la mise en œuvre des procédés RTM. En effet, les seuils de rugosité observés dans le chapitre précédent varient suivant l'outil utilisé mais sont dans tous les cas supérieurs à l'objectif industriel de qualité de surface.

Actuellement, les moules en matériaux composites subissent une opération de polissage manuel après l'usinage. Cette opération est décomposée en une opération de ponçage à sec suivie d'une opération de ponçage à l'eau. Suivant l'état du moule après l'usinage, deux à quatre étapes de polissage à sec puis à l'eau avec des papiers à granulométrie décroissante doivent être pratiquées. Les papiers abrasifs utilisés présentent des granulométries de 80 à 320 pour le ponçage à sec puis de 600 à 1000 pour le ponçage à l'eau. Cette tâche manuelle est fastidieuse et difficilement répétable car elle dépend fortement du savoir faire de l'opérateur.

L'automatisation du polissage présente de nombreux avantages et la littérature montre que de nombreuses études ont été menées sur le polissage de moules métalliques avec des robots anthropomorphes, des robots parallèles et des centres d'usinage. De plus, des travaux menés sur le meulage de matériaux composites montrent que ce procédé permet d'atteindre une grande qualité d'état de surface [Hu04]. Ainsi, un état de l'art sur les procédés de finition par outil abrasif est proposé au paragraphe 1. Les contraintes et les avantages de ces procédés sont discutés et aboutissent à la définition d'un outil dédié à la finition de moules en matériaux composites, utilisable sur un centre d'usinage. Une étude de faisabilité permet de

mettre en évidence les différentes capacités et limites de cette technologie et fait l'objet du paragraphe 2.

## **1. Etat de l'art sur les procédés abrasifs**

Comme toute opération d'usinage, les procédés d'enlèvements de matière par abrasion ont pour objectif de permettre à une pièce d'être réalisée avec des dimensions et un état de surface souhaités. Contrairement aux procédés par outil coupant (foret, outil monobloc, plaquettes rapportées...) qui enlève la matière sous forme de copeaux de taille millimétrique, l'enlèvement de matière par abrasion est réalisé à l'échelle micrométrique par des grains abrasifs de taille, de forme et d'orientations variables.

### **1.1. Les principes de mise en œuvre**

On distingue communément les trois principes de mise en œuvre des procédés abrasifs [Felder09] :

- Les procédés d'abrasion à deux corps : Les grains abrasifs sont solidaires d'un support : meule, bande ou fil. Leur mouvement par rapport à la pièce est identique à celui effectué par le support (Figure 3-1 (a)). Les grains sont mis en contact avec la pièce et une pression notée  $P$  est exercée par le support, leur translation relative à la surface de la pièce produit l'enlèvement de matière.
- Les procédés d'abrasion à trois corps : Les grains abrasifs ne sont pas solidaires à un support. Le mouvement des grains par rapport à la pièce est complexe, il est composé de glissements et de roulements. L'enlèvement de matière est contrôlé à l'aide de pression normale exercée par la contre pièce et éventuellement par un liquide ou une pâte (Figure 3-1 (b)).
- Les procédés par érosion : Les grains abrasifs sont projetés à grande vitesse sur la pièce. Ils peuvent être portés par un fluide comme l'eau. L'énergie cinétique produit l'enlèvement de matière (Figure 3-1 (c)). Ce type de procédé est plutôt réservé à des applications de découpe, comme les opérations de détournage de pièces composites. Il ne convient pas à la problématique de finition de moules.

Les principales opérations d'abrasion à deux corps sont le meulage et la rectification. Toutefois, il existe d'autres types d'opérations utilisant des meules fines, des fils revêtus d'abrasifs, ainsi que des bandes abrasives. Les opérations de meulage sont en général

réservées à des applications d'ébavurage de pièce. La rectification confère à la pièce une forme géométrique précise et une faible rugosité grâce à un contrôle précis des mouvements de la meule par rapport à la pièce. Selon la forme de la surface de la pièce, on distingue la rectification plane de la rectification cylindrique.

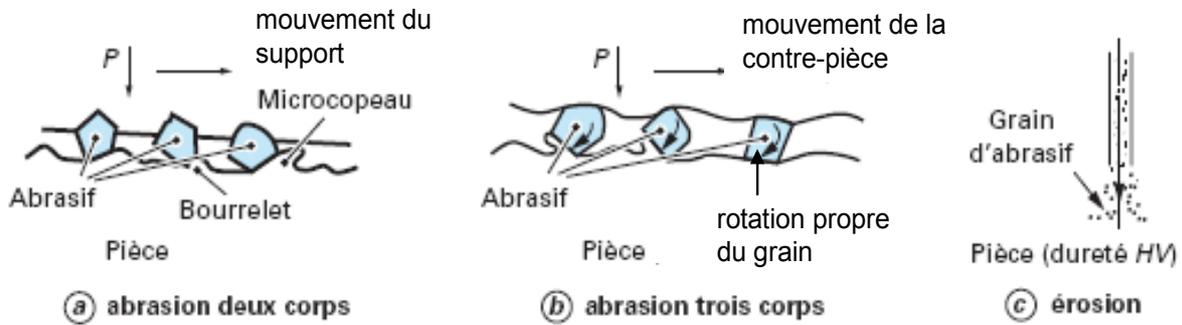


Figure 3-1: procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs [Felder09]

Les principales opérations d'abrasion à trois corps sont le rodage et le polissage. Le rodage confère à une surface plane ou axisymétrique une forme géométrique précise et une faible rugosité en faisant glisser sur la surface de l'abrasif en poudre avec une contre-pièce de forte rigidité et de la forme adéquate. Le polissage abaisse la rugosité de la pièce avec une contre-pièce présentant une souplesse contrôlée (Figure 3-2), fabriquée en métal, en résine, en élastomère ou encore en textile. Le polissage est largement employé pour la finition d'outillage d'emboutissage et d'injection plastique [Pessoles09], [Wu07].

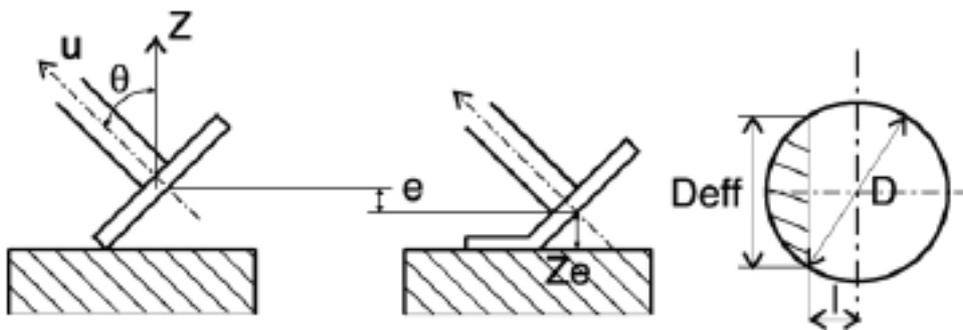


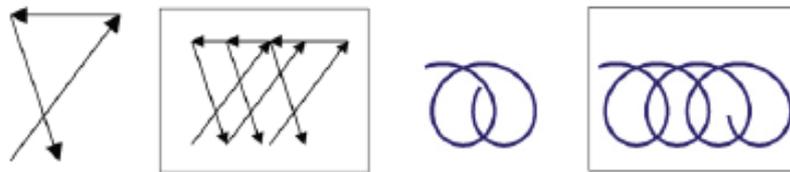
Figure 3-2: outil de polissage à souplesse contrôlée et zone de contact entre l'outil et la pièce [Pessoles09]

La partie suivante répertorie les avantages et les contraintes de cette variété de procédés et aboutit à un choix technologique adapté à la finition de moules en Hextool™.

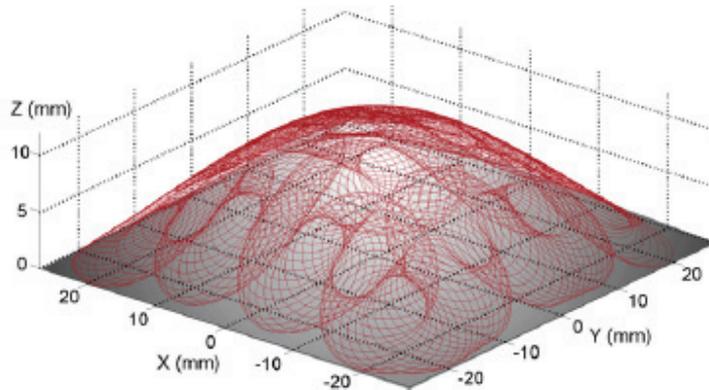
## 1.2. Inventaire et choix d'une solution abrasive pour la finition

### 1.2.1. Polissage sur machine à commande numérique

L'automatisation du polissage procure des avantages et la littérature relate plusieurs expériences pour la finition de moule métallique. Pour le polissage, des robots anthropomorphes [Marquez05], des robots parallèles [Roswell06] et des machines d'usinage à commande numérique, à trois ou cinq axes [Huissoon02], [Pessoles09], peuvent être employées. Toutefois, les trajectoires de polissage doivent être multidirectionnelles (Figure 3-3) afin de réaliser un enlèvement de matière suffisamment conséquent pour atteindre les exigences d'état de surface et éviter les défauts d'ondulation [Tsai06], [Pessoles09].



(a) motifs élémentaires et trajectoires multidirectionnelles de polissage



(b) trajectoire de polissage sur une surface convexe

Figure 3-3: trajectoires de polissage [Pessoles09]

De plus, le contrôle de la force de polissage est un paramètre prépondérant du procédé. En effet, le taux d'enlèvement de matière (profondeur de coupe par unité de temps), notée  $Z$  (m/s), est proportionnel à la pression  $P$  ( $N/m^2$ ) exercée par l'outil sur la pièce et à la vitesse de glissement de l'outil sur la pièce (notée  $\Delta v$ ). Le débit de matière est exprimé dans l'équation (7), selon la loi de Preston [Preston27], dont le coefficient  $k$  ( $m^2/N$ ) est appelé constante de Preston, qui dépend de la dureté du matériau usiné et du pouvoir d'abrasion de l'outil.

$$Z = kP\Delta v \quad (7)$$

Pour obtenir un état de surface satisfaisant, le taux d'enlèvement de matière, la pression exercée par l'outil et sa déformation doivent être maîtrisés tout au long de l'opération de polissage (Figure 3-2). Ceci passe donc par l'emploi de trajectoires multidirectionnelles (Figure 3-3). Toutefois, les débits de matière obtenus par le polissage sont faibles et estimés à une valeur environ cent fois inférieures aux débits obtenus par usinage avec un outil coupant [Felder09]. Ce faible débit pénalise la productivité et induit un haut niveau d'exigence sur l'opération de finition par outil coupant afin de contrôler les motifs laissés sur la pièce et donc de minimiser le volume de matière à retirer par polissage.

L'ensemble des contraintes de mise en œuvre liées au polissage automatisé complique sa mise en application sur un centre d'usinage. Actuellement, ce procédé est réservé majoritairement à des applications où un poli miroir est exigé ce qui n'est pas le cas pour les moules en Hextool™. Par la suite, nous allons donc nous intéresser à des techniques de finition par abrasion autres que le polissage.

### 1.2.2. Le meulage

Le terme générique de meulage regroupe les opérations d'ébarbage, d'ébavurage et de découpe à l'aide de disques, de bandes ou encore de fils recouverts d'abrasifs. Pour ces applications de parachèvement, les mouvements de l'outil par rapport à la pièce n'ont pas besoin d'être contrôlés avec précision. Lorsque la pièce nécessite une grande qualité dimensionnelle et une faible rugosité, le mouvement de la meule est alors piloté avec précision, nous parlons alors de rectification plane ou cylindrique suivant la géométrie de la pièce [Felder09].



Figure 3-4: Grinding Center Helitronic de marque Walter

Depuis quelques années, des machines de rectification à commande numérique, machines multi-axes dédiées à l'emploi d'outils abrasifs, ont fait leur apparition [Wu07] (Figure 3-4). Ces machines disposent d'un système de lubrification adapté à l'emploi d'outils abrasifs, en général de l'huile entière privilégiée à l'huile soluble. De plus ces machines disposent généralement d'un système de dressage automatique de la meule. Le profil des meules employées varient suivant les applications et le nombre d'axes pilotés de la machine.

Les études menées sur les procédés de rectification montrent leur capacité à produire une grande qualité d'état de surface [Zhou02], [Hecker03], certes inférieures à celle produite par polissage mais suffisante pour notre application. De plus, ces procédés de meulage sont plus productifs et aisés à mettre en œuvre que les procédés de polissage [Fleder09]. En effet, lors du meulage le contrôle de la pression exercée par l'outil sur la pièce n'est pas nécessaire et les trajectoires peuvent être similaires à celles employées en fraisage : il n'est pas utile d'utiliser des trajectoires multidirectionnelles. Enfin, des travaux menés sur le meulage de matériaux composites montrent qu'il est possible d'atteindre des rugosités inférieures à  $1 \mu\text{m}$  [Hu04]. Toutefois, l'état de surface obtenu est fortement dépendant de l'orientation des fibres et à l'instar de l'usinage nous pouvons observer des mécanismes d'enlèvement de matière différents suivants l'orientation des fibres [Hu04] (Figure 3-5).

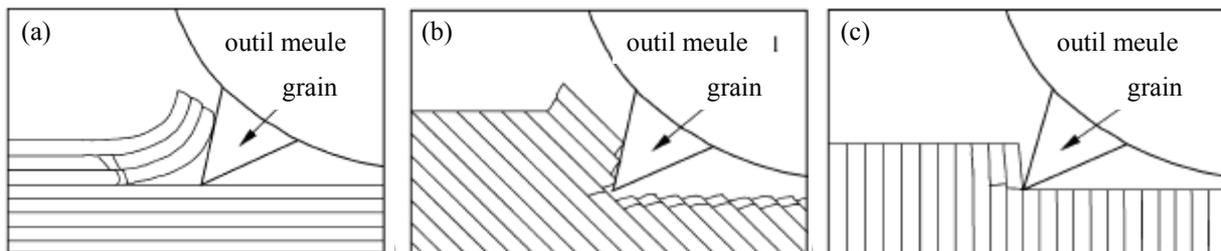


Figure 3-5: mécanismes d'enlèvement de matière en meulage suivant l'orientation des fibres [Hu04]

### 1.2.3. Bilan

L'état de l'art réalisé nous a conduit à étudier une solution d'outil meule utilisable sur un centre d'usinage 5 axes. En effet, la qualité d'état de surface accessible avec une meule semble suffisante pour notre application [Hu04]. De plus, ce procédé est plus facile à mettre en œuvre que le polissage automatisé car le contrôle des efforts n'est pas nécessaire et les trajectoires de meulage sont semblables à celles utilisées en fraisage. Enfin, le meulage autorise des débits de matière plus conséquents [Felder09], ce qui permet d'améliorer la productivité car la qualité attendue de l'opération de finition par outil coupant n'a pas besoin d'être d'un aussi haut niveau. D'autre part, l'emploi d'une machine identique pour l'usinage

du moule en Hextool™ et pour sa finition par procédé abrasif représente un intérêt économique car il évite d'investir dans différents outils de production.

Dans la partie suivante, la définition de l'outil meule mis au point et les différents essais de mise en œuvre pour qualifier ses performances sont présentés.

## 2. Finition par outil abrasif

### 2.1. Définition de l'outil meule

Afin de réaliser une opération de meulage de moules en matériaux composites sur un centre d'usinage 5 axes, une géométrie d'outil spécifique est développée en collaboration avec la société Asahi Diamond Industrial Europe (Figure 3-6). Il s'agit d'un outil meule composé à 75% de grains de diamant tenus par un liant métallique.

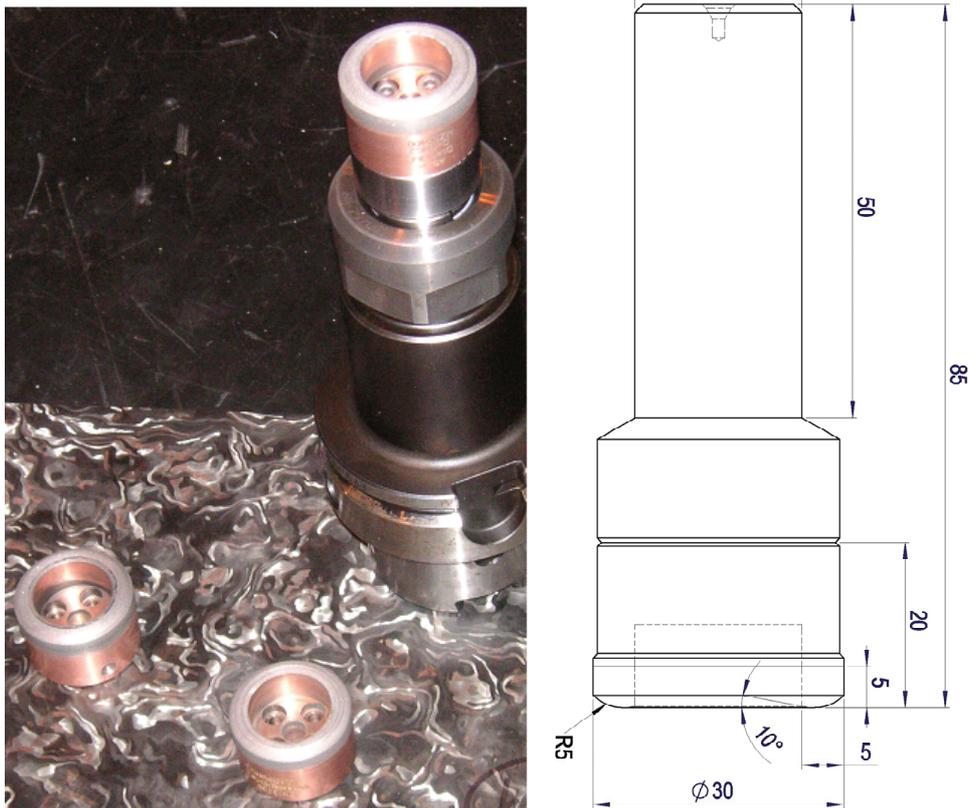


Figure 3-6: outil meule avec têtes abrasives interchangeables

Cet outil prototype dispose d'un système de têtes interchangeables qui permet de tester différentes granulométries d'abrasifs en conservant le même corps d'outil. En effet, de nombreux travaux ont montré l'influence de la granulométrie de l'abrasif sur la qualité d'état de surface et les efforts générés [Zhou02], [Hecker03], [Demirci10].

Les abrasifs conventionnels sont l'alumine et les carbures de silicium. Pour les applications plus spécifiques, nécessitant des performances plus élevées, il est possible d'employer des nitrures de bore cubique ou du diamant (naturel ou synthétique). Ces matériaux sont qualifiés de « superabrasifs » leur dureté, leur résistance à l'usure mais aussi leur prix est nettement supérieur à celui des abrasifs conventionnels [Felder09]. Compte-tenu du caractère abrasif des fibres de carbone de l'Hextool™ et de l'expertise de la société Asahi Diamond Industrial Europe, le diamant synthétique est retenu pour l'outil meule prototype.

Les abrasifs se présentent sous forme de grains de géométries et de tailles variables. Les Figure 3-7 (a) et (b) sont des images microscopiques de grains de diamant de taille régulière et irrégulière, la Figure 3-7 (c) montre des grains de carbure de silicium. Les grains sont triés par des opérations de tamisage lorsque leur taille dépasse 100 µm environ et par sédimentation pour des tailles inférieures. Au final, le lot de grains abrasifs utilisé pour réaliser une meule présente toujours une distribution granulométrique, c'est-à-dire avec une taille de grains comprise selon une certaine distribution.

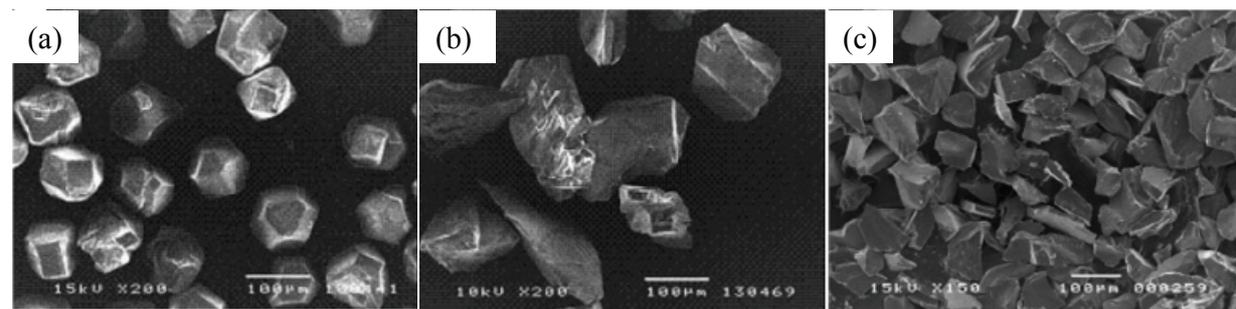


Figure 3-7: grains abrasifs de taille et de géométrie variable [Demirci10]

Afin d'observer l'impact de la granulométrie sur la qualité de surface générée par l'outil meule sur les moules en matériaux composites, trois têtes présentant une granulométrie moyenne de 25, 40 et 46 µm sont utilisées pour les essais. Ces granulométries ont été retenues suite à des essais préliminaires menés par Asahi Diamond Industrial Europe sur une rectifieuse à meule périphérique et arrosage à l'huile entière. Dans ces conditions, une granulométrie de 16 µm a permis d'atteindre une rugosité arithmétique de 0,4 µm dans l'Hextool™.

Au cours des essais réalisés, les outils meules sont périodiquement avivés avec une pierre abrasive, pour désencrasser l'outil et reprofiler sa géométrie. La pierre utilisée pour l'avivage est composée de verre et d'alumine d'une granulométrie de 58 µm. L'avivage des meules est une opération courante pour les outils abrasifs, certains constructeurs de machine

propose même des systèmes automatisés standards pour cette opération (Figure 3-4). L'usage de la pierre d'avivage au cours des essais menés est systématiquement mentionné.

La géométrie retenue pour l'outil meule est proche de celle d'une fraise torique (Figure 3-6), alors que les outils de meulage se présentent, classiquement, sous la forme d'une roue de rectification, dont la géométrie n'est pas adaptée à l'usinage de formes gauches apparaissant sur un moule. De plus, le diamètre de 30 mm retenue pour cet outil résulte d'un compromis entre accessibilité et résistance à l'usure, car la durée de vie d'un outil abrasif est proportionnelle à son diamètre [Childs01].

## 2.2. Protocole expérimental

Des essais sont menés en faisant varier les différents paramètres du procédé. Pour cela, des plaques en Hextool™ de 140 x 200 mm sont préalablement surfacées avec une fraise droite en PCD, elles présentent alors une rugosité arithmétique moyenne d'environ 2  $\mu\text{m}$ . Les essais de faisabilité sont conduits sur un centre d'usinage 5 axes (Huron KX15) sous arrosage à l'huile soluble (Figure 3-8 (b)). Habituellement, l'huile entière est privilégiée pour les opérations de meulage, l'influence de l'huile soluble sur ce procédé est discutée dans la partie suivante. Un porte-outil standard, à pince, avec un attachement HSK 63 est utilisé pour monter l'outil prototype. Un relevé d'efforts dans trois directions de coupe est réalisé avec un porte-pièce dynamométrique (Kistler 9257B). Après l'opération de meulage, des mesures de rugosité arithmétique sont réalisées avec un rugosimètre Mitutoyo Roughness SurfTest SV500 (Figure 2-16). Les réglages de l'appareil sont effectués conformément à la norme ISO 4288 (cf. Chapitre 2, §2.2.2), c'est-à-dire avec une longueur de base et longueur d'onde de coupure valant 0,8 mm compte tenu des valeurs de rugosité mesurées.

Au cours de ces essais, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe axiale  $a_p$  varient. Pour chaque jeu de paramètres, une zone de 70 x 16,2 mm est usinée avec l'outil meule (Figure 3-8 (a)). La stratégie d'usinage employée est un balayage en plans parallèles, avec des angles de dépinçage longitudinal et latéral de respectivement  $\theta_t = 1^\circ$  et  $\theta_n = 0^\circ$ , et une prise de passe radiale  $a_e$  de 2,7 mm. Compte-tenu de ces valeurs, de la géométrie de l'outil meule (Figure 3-6) et de l'étude géométrique menée au Chapitre 2 §2.1, la valeur de la prise de passe engendre une valeur de rugosité arithmétique théorique de 0,27  $\mu\text{m}$ , nettement inférieure à la valeur objectif de 0,8  $\mu\text{m}$ , ceci afin d'évaluer la rugosité minimale accessible. En effet, avec une faible valeur de prise de passe radiale, les effets géométriques

du balayage sur la qualité de surface deviennent négligeables par rapport à la réaction du matériau et notamment aux arrachements (cf. Chapitre 2).

### 2.3. Faisabilité d'une opération de meulage sur un centre d'usinage

Une première série d'essais est conduite afin de déterminer des conditions de coupe initiale pour notre étude de faisabilité. Pour cela, quatre zones sont usinées (Figure 3-8 (a)) avec la tête abrasive présentant une granulométrie de 25  $\mu\text{m}$  et les paramètres de coupe du Tableau 3-1.

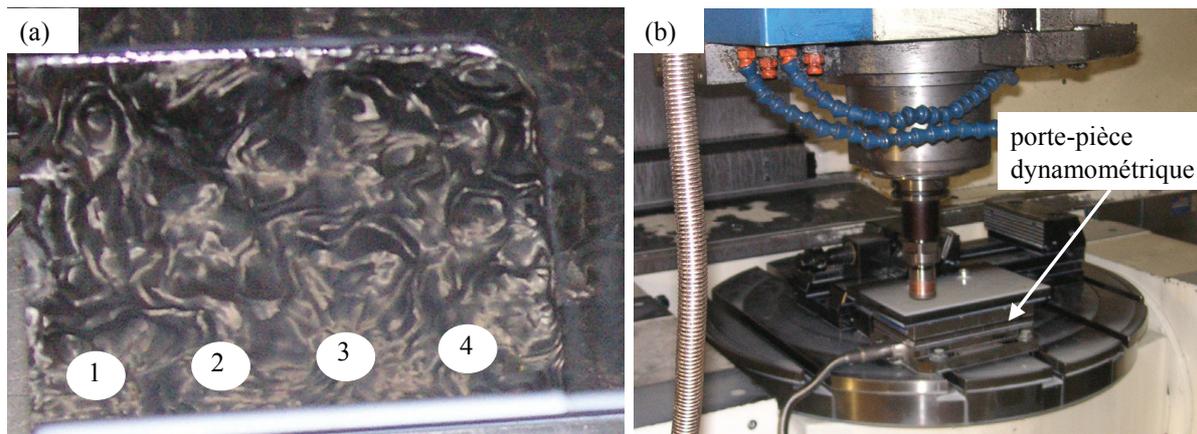


Figure 3-8: (a) 4 zones usinées lors des premiers essais de faisabilité ; (b) protocole expérimental

Les vitesses de coupe et d'avance testées sont les valeurs classiquement utilisées en rectification [Zhou02], [Hu04]. La prise de passe axiale  $a_p$  vaut 0,65 mm, qui est largement supérieure à celles employées usuellement en rectification plane ou cylindrique [Hu04], mais correspond à la surépaisseur laissée en finition. Nous avons fait ce choix car il est intéressant pour un outil de finition de moule de pouvoir tolérer les variations de surépaisseur dues à l'opération de semi-finition. Ce point est discuté plus largement au §2.4.

Zone	1	2	3	4
<b>N (tr/min)</b>	9500	10500	11500	11500
<b>Vc (m/min)</b>	890	990	1080	1080
<b>Vf (mm/min)</b>	100	160	225	300
<b>f (mm/tr)</b>	0,01	0,015	0,02	0,026
<b><math>a_c</math> (mm)</b>	2,7	2,7	2,7	2,7
<b><math>a_p</math> (mm)</b>	0,65	0,65	0,65	0,65

Tableau 3-1: paramètres de coupe de meulage

L'huile soluble utilisée au cours de ces essais semble adaptée au meulage des matériaux composites et peut se substituer à l'utilisation de l'huile entière. En effet, aucun encrassement de l'outil meule n'est constaté au cours de ces essais.

Pour les quatre zones usinées, des mesures de rugosité sont conduites transversalement et suivant la direction de balayage. Les valeurs de rugosité arithmétique moyennes obtenues sont identiques dans les deux directions, à cause des faibles valeurs de prise de passe radiale choisies. Par la suite, seules les mesures pratiquées transversalement à la direction de balayage sont présentées. De plus, la dispersion observée sur les mesures de rugosité est de l'ordre de  $0,1 \mu\text{m}$  (Figure 3-9). Cette dispersion est nettement inférieure à celle observer avec des outils coupant en PCD (cf. Chapitre 2). Néanmoins elle s'explique là encore par l'hétérogénéité de l'Hextool™ et l'orientation aléatoire de ses renforts fibreux [Hu04]. Pour obtenir la valeur moyenne de rugosité arithmétique, les mesures sont répétées cinq fois (Figure 3-9).

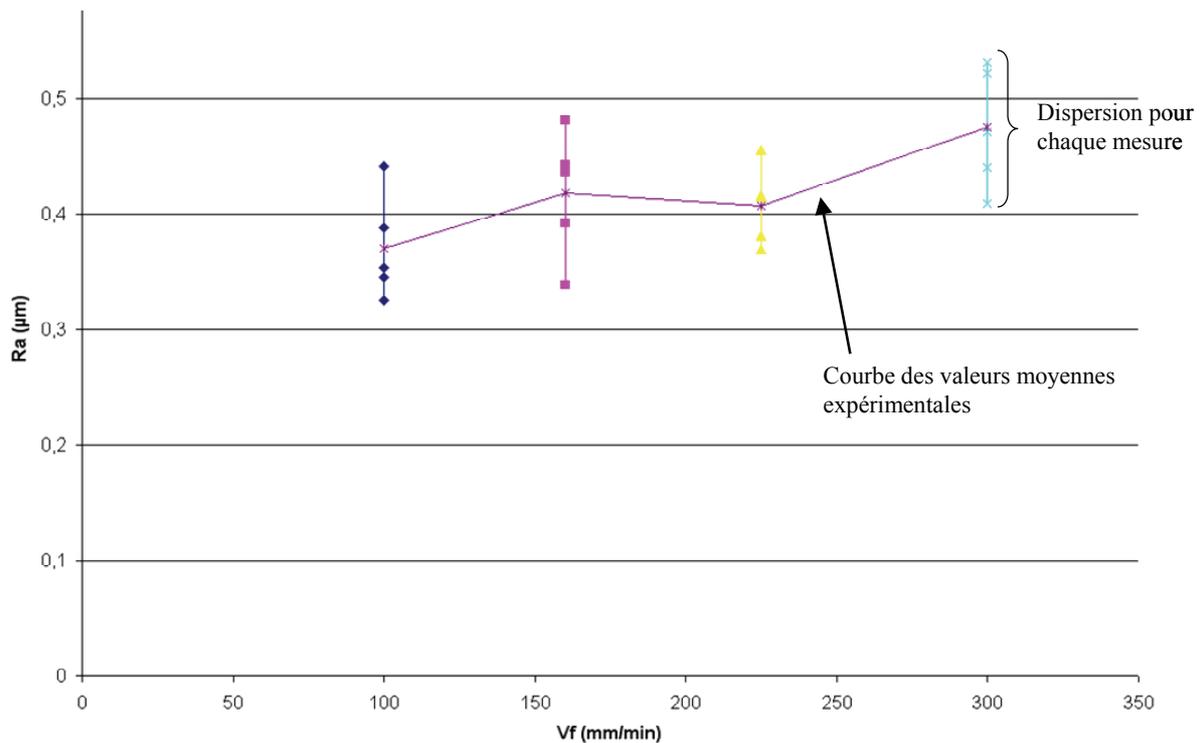


Figure 3-9: mesures de rugosité dans la direction transversale

La Figure 3-9 montre que la vitesse de coupe et d'avance ont une influence très limitée sur la qualité de surface générée par l'outil meule. L'outil est avivé avec une pierre abrasive entre les zones deux et trois, ce qui doit expliquer sans doute la stabilisation de la rugosité obtenue entre ces deux zones alors que les conditions d'usinage sont plus sévères. En effet, l'avivage permet de désencrasser l'outil et d'augmenter son pouvoir abrasif. Par la suite, afin

d'être plus productif et plus proche de la réalité industrielle, les opérations d'avivage sont espacées et systématiquement indiquées.

Les résultats expérimentaux montre que la rugosité obtenue avec l'outil meule de granulométrie 25  $\mu\text{m}$  est inférieure à la valeur escomptée de Ra 0,8  $\mu\text{m}$ . Ces premiers essais montrent la faisabilité et la pertinence d'une opération de meulage sous arrosage à l'huile soluble sur un centre d'usinage. Après ces essais, nous estimons qu'une vitesse de coupe de 1080 m/min et une vitesse d'avance de 300 mm/min peuvent être considérées comme des paramètres initiaux pour ce procédé. Des essais complémentaires permettent de montrer la capacité de cette technologie à tolérer des variations de prise de passe axiale.

#### 2.4. Capacité à tolérer des variations de prise de passe axiale $a_p$

Dans le cas de l'usinage d'un moule industriel, des variations dues aux motifs laissés par l'opération de semi-finition de surépaisseur peuvent apparaître lors de l'opération de finition [Toh05]. Il est donc intéressant pour un outil de finition de tolérer des variations de prise de passe axiale. En effet, cette capacité permet de rendre l'opération de semi-finition plus productive. Pour évaluer cette capacité, deux géométries différentes sont usinées avec la tête abrasive présentant la granulométrie de 25  $\mu\text{m}$ .

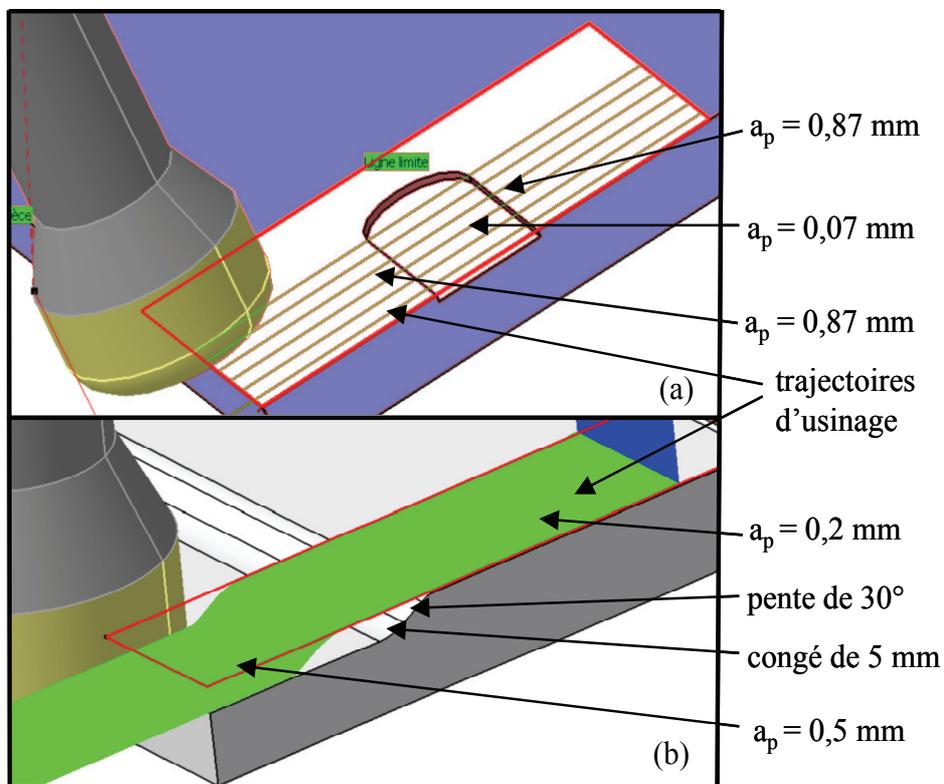


Figure 3-10: Géométries et trajectoires d'usinage présentant des variations de prise de passe axiale

Le cas de la Figure 3-10 (a) permet de tester l'outil sur une variation abrupte de surépaisseur de 0,87 mm à 0,07 mm puis de 0,07 mm à 0,87 mm. Des mesures de rugosité sont conduites sur l'ensemble de la surface usinée avec une attention particulière à la zone de transition de  $a_p$ . Quelque soit la zone et la direction de mesure, une rugosité arithmétique moyenne de 0,5  $\mu\text{m}$  est constatée. L'outil meule semble donc bien tolérer les variations abruptes de surépaisseur pour la plage de  $a_p$  testée.

Afin de confirmer ce résultat, une deuxième géométrie est usinée (Figure 3-10(b)). Dans ce cas,  $a_p$  varie progressivement de 0,5 mm à 0,2 mm en usinant un plan incliné à 30° par rapport à l'horizontal. Cette surface est obtenue par une opération de balayage en plan parallèles avec une fraise droite de diamètre 16 mm. Ainsi, cette opération de semi-finition génère sur la surface un motif présentant une hauteur de crête maximale de 0,2 mm sur la partie inclinée (Figure 3-11 (b)).

Des mesures de rugosité sont pratiquées après l'opération de finition à l'outil meule dans toutes les zones de la surface usinée et dans les deux directions (transverse et suivant la direction d'avance). La rugosité arithmétique moyenne obtenue sur l'ensemble des zones mesurées est de 0,45  $\mu\text{m}$ . Cette valeur est légèrement plus faible que dans le cas précédent. Cette différence s'explique par l'opération d'avivage pratiquée entre ces deux essais (Figure 3-10 (a) et (b)). Malgré tout, là encore la qualité de surface obtenue n'est pas influencée par les variations de surépaisseurs qui se traduisent pour l'outil par des variations de prise de passe axiale.

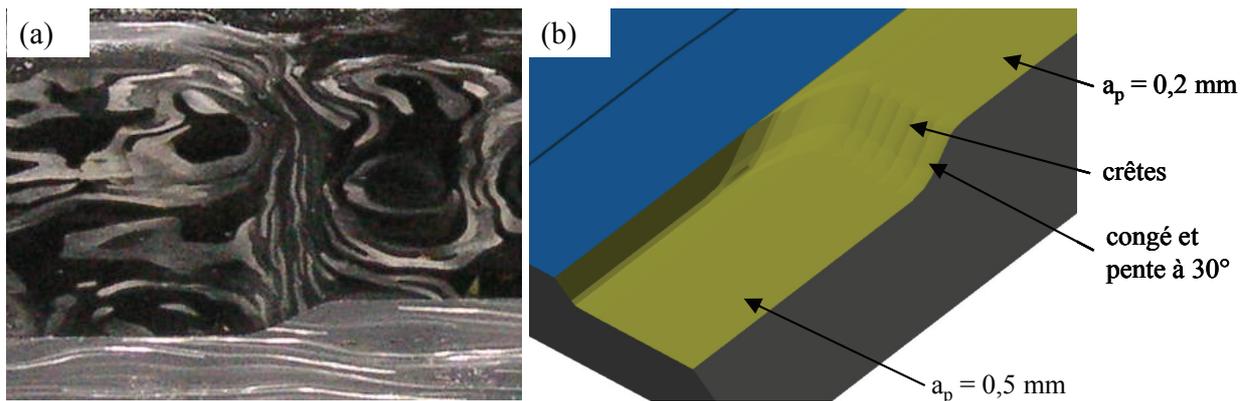


Figure 3-11: (a) pièce après finition à l'outil meule ; (b) géométrie avant finition

Au cours de ces essais, la prise de passe axiale varient de 0,07 à 0,87 mm. Des variations abruptes et progressives sont tolérées par l'outil meule sans endommagement ni influences sur la qualité de surface produite. Des valeurs supérieures de prises de passe axiale ne sont pas testées par crainte d'endommager l'outil. Toutefois, la plage de valeurs de  $a_p$

testée couvre la plupart des variations de surépaisseur laissées par l'opération de semi-finition lors de l'usinage d'un moule. La capacité de l'outil meule à tolérer des variations de surépaisseur est démontrée. Cette propriété est extrêmement intéressante du point de vue de la productivité car elle permet de contraindre les opérations de semi-finition.

### 2.5. Productivité de l'outil meule

Les vitesses d'avance employées jusqu'à présent sont faibles. Afin de juger de la productivité d'une opération de finition par abrasion sur un centre d'usinage, des essais avec une vitesse d'avance variant de 300 à 1200 mm/min sont menés avec la tête abrasive présentant une granulométrie de 25  $\mu\text{m}$ . Huit zones de 16,2 x 70 mm sont usinées avec une vitesse de coupe constante de 1080 m/min et des prises de passe axiale et radiale valant respectivement 0,5 et 2,7 mm. L'outil est avivé une seule fois au début de cette série d'essais. Les valeurs de rugosité obtenues apparaissent sur la Figure 3-12.

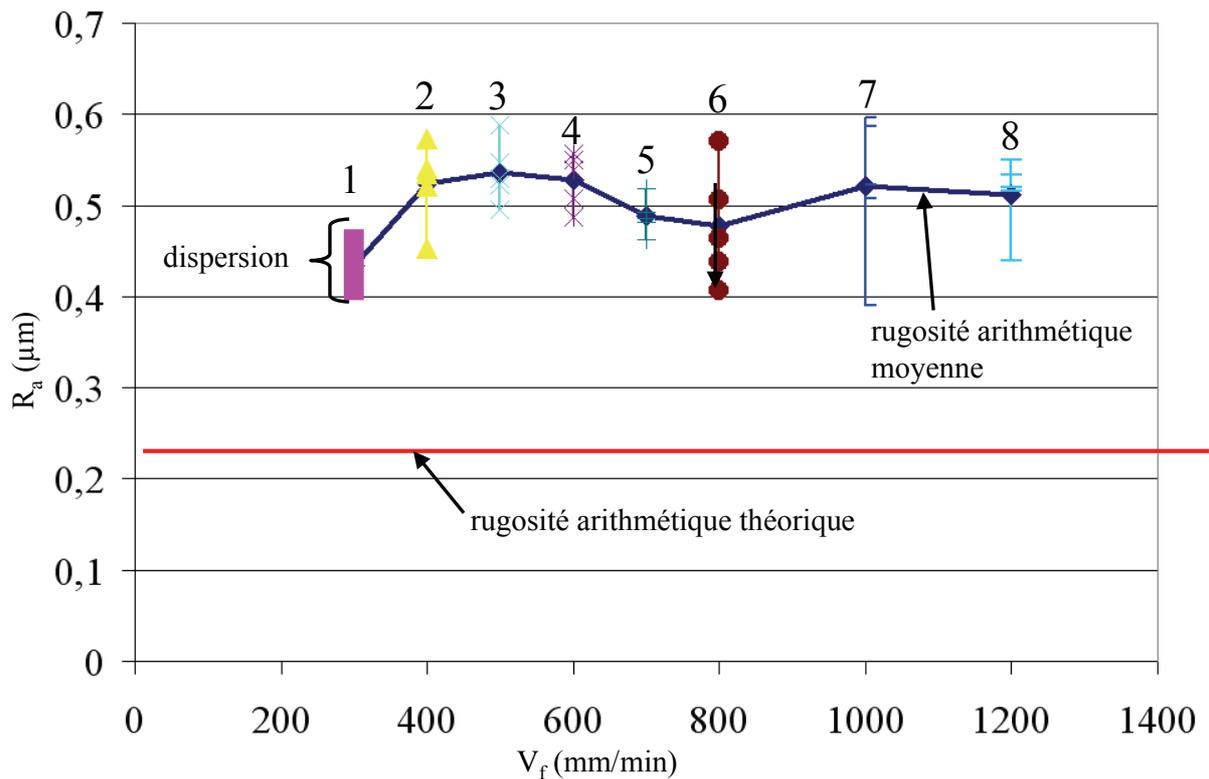


Figure 3-12: Evolution de la rugosité arithmétique moyenne en fonction de la vitesse d'avance

La vitesse d'avance n'a pas d'impact sur la rugosité arithmétique moyenne pour la plage testée, mesurée uniformément à 0,5  $\mu\text{m}$ . Toutefois, l'augmentation de la rugosité entre les zones 1 et 2 peut s'expliquer par l'avivage pratiqué avant le début des essais. De plus une dispersion d'environ 0,15  $\mu\text{m}$  est constatée sur les mesures, ceci s'explique par le caractère hétérogène de l'Hextool™.

La valeur maximale de vitesse d'avance employée ici (1200 mm/min) est inférieure aux valeurs utilisées avec des fraises en PCD (environ 5000 mm/min pour une fraise de 30 mm de diamètre avec quatre dents). Cependant, la qualité d'état de surface produite avec les outils abrasifs permet de réduire fortement voir de supprimer l'opération de polissage manuelle. Ceci est impossible lorsqu'une simple finition avec une fraise en PCD est pratiquée. La perte de productivité sur l'opération de finition par rapport aux outils PCD semble donc négligeable par rapport à la pénibilité et au temps consacré à une opération de polissage manuelle. La productivité globale de la gamme de fabrication d'un moule en Hextool™ est discutée au Chapitre 4.

## 2.6. Analyse de la rugosité obtenue

Afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors d'une finition par outil abrasif et l'obtention d'une telle qualité de surface comparée aux outils coupants, les efforts de coupe et des images obtenues par microscopie électronique à balayage de surface usinée sont analysées. Les efforts générés par l'outil meule en fonction de la vitesse d'avance apparaissent sur la Figure 3-13.

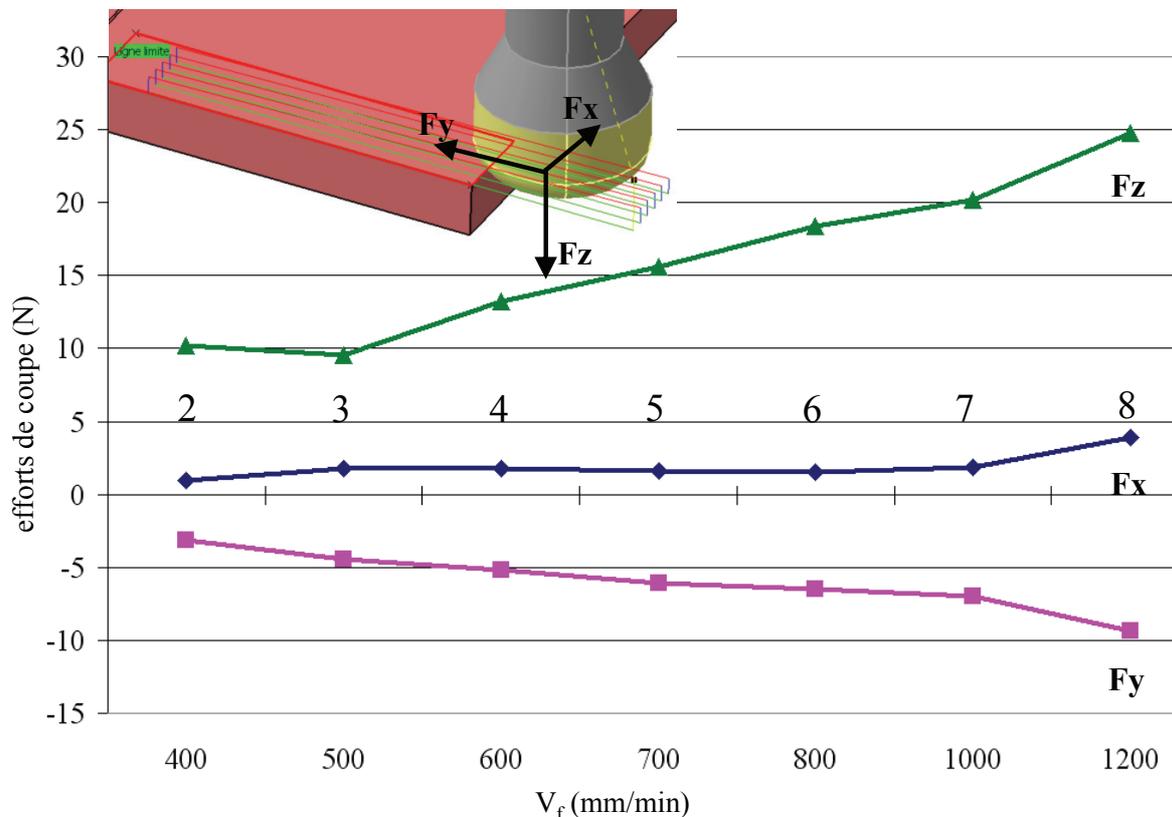


Figure 3-13: effort de meulage en fonction de la vitesse d'avance

Les efforts de meulage mesurés, de l'ordre de quelques Newtons, sont nettement inférieurs à ceux rencontrés en usinage par outil coupant, conformément les constatations de la littérature [Hu04]. Ces faibles valeurs d'efforts permettent de réduire les phénomènes de déformation du moule et de flexion d'outil lors de la finition. La qualité dimensionnelle du moule usinée avec ce procédé abrasif semble donc garantie de ce point de vue. Toutefois, nous verrons dans la partie suivante que la qualité dimensionnelle peut être altérée par des problèmes d'usure d'outil.

La composante de l'effort suivant l'axe outil ( $F_z$ ) est la plus importante. Ce phénomène est observé dans les autres travaux, notamment sur la rectification de matériaux composites [Hu04]. De plus, lorsque la vitesse d'avance augmente, toutes les composantes d'effort augmentent mais la composante verticale croît plus rapidement. La composante  $F_z$  a quasiment triplé (de 10 à 25 N) entre les zones 1 et 8, c'est pourquoi, des vitesses d'avance supérieures à 1200 mm/min ne sont pas testées afin d'éviter d'endommager l'outil.

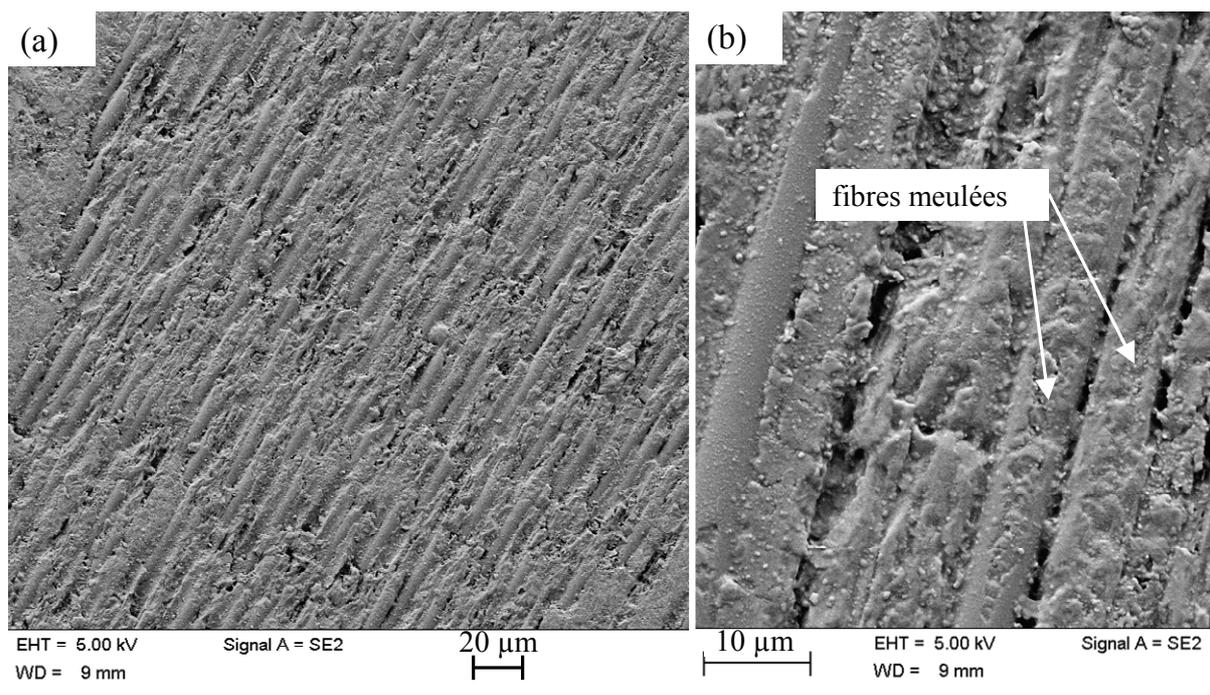


Figure 3-14: images MEB d'une surface usinée avec l'outil meule (granulométrie 25 µm)

Ces faibles valeurs d'effort expliquent en partie la qualité de surface obtenue. En effet, l'étude menée au Chapitre 2 montre l'influence des arrachements liés à la coupe sur l'état de surface obtenu. Or les arrachements générés par la coupe sont liés aux efforts de coupe [Wang03], [Rao07b] : plus les efforts sont importants, plus les arrachements sont prononcés. Les efforts très faibles en meulage comparés à ceux de l'usinage entraînent donc moins

d'arrachements et un meilleur état de surface. Afin de valider ce résultat, une analyse de la surface après usinage à l'outil meule s'appuyant sur des images prises au MEB est proposée (Figure 3-14).

Nous constatons que le procédé de meulage engendre des arrachements de matière moins importants que les procédés par outil coupant (Chapitre 2, Figure 2-23 (c et d)). En effet, les efforts faibles permettent de meuler les fibres sans les arracher (Figure 3-14 (b)).

Les procédés par abrasion permettent d'atteindre une grande qualité de surface en limitant les arrachements, cependant leur tenue à l'usure demeure inconnue. La partie suivante permet d'apporter quelques éléments de réponse sur cette propriété essentielle à une utilisation industrielle.

## **2.7. Usure de l'outil meule**

### **2.7.1. Choix d'une granulométrie adaptée**

L'état de l'art montre que la granulométrie des grains composants les outils abrasifs a un fort impact sur leur durée de vie [Childs01], [Zhou02], [Demirci10]. Les essais commentés précédemment ont été réalisés avec la tête abrasive présentant une granulométrie de 25  $\mu\text{m}$ , pour produire une rugosité arithmétique moyenne de 0,5  $\mu\text{m}$ . Afin de pouvoir optimiser la durée de vie et les paramètres de coupe pour ce procédé, il est essentiel d'identifier la granulométrie la mieux adaptée à notre besoin. Pour cela, des essais de finition par balayage en plans parallèles sont menés avec des granulométries d'outil de 40 et 46  $\mu\text{m}$ . Une vitesse de coupe de 1080 m/min, un angle dépinçage longitudinal de 1° et des prises de passe axiale et radiale valant respectivement 0,5 et 2,7 mm sont employées. Les valeurs de rugosité arithmétique moyenne constatée sur les échantillons en fonction de la vitesse d'avance apparaissent sur la Figure 3-15.

Les valeurs de rugosité arithmétique moyenne rapportées sur la Figure 3-15 montrent que la granulométrie a un impact important sur la qualité de surface obtenue. En effet, des granulométries de 25, 40 et 46  $\mu\text{m}$  engendrent des rugosités arithmétiques moyennes valant respectivement 0,5  $\mu\text{m}$ , 0,75  $\mu\text{m}$  et 0,95  $\mu\text{m}$ . La vitesse d'avance ne semble pas avoir d'impact sur la qualité d'état de surface obtenue pour la plage testée. La tête abrasive la plus adaptée à notre application de moules en Hextool™ présente donc une granulométrie de 40  $\mu\text{m}$ , elle permet d'obtenir un  $R_a$  de 0,75  $\mu\text{m}$  pour un objectif de 0,8  $\mu\text{m}$ . Cette mesure de rugosité est validée par une mesure au profilomètre 3D pour confirmer les résultats du rugosimètre mécanique (Figure 3-16).

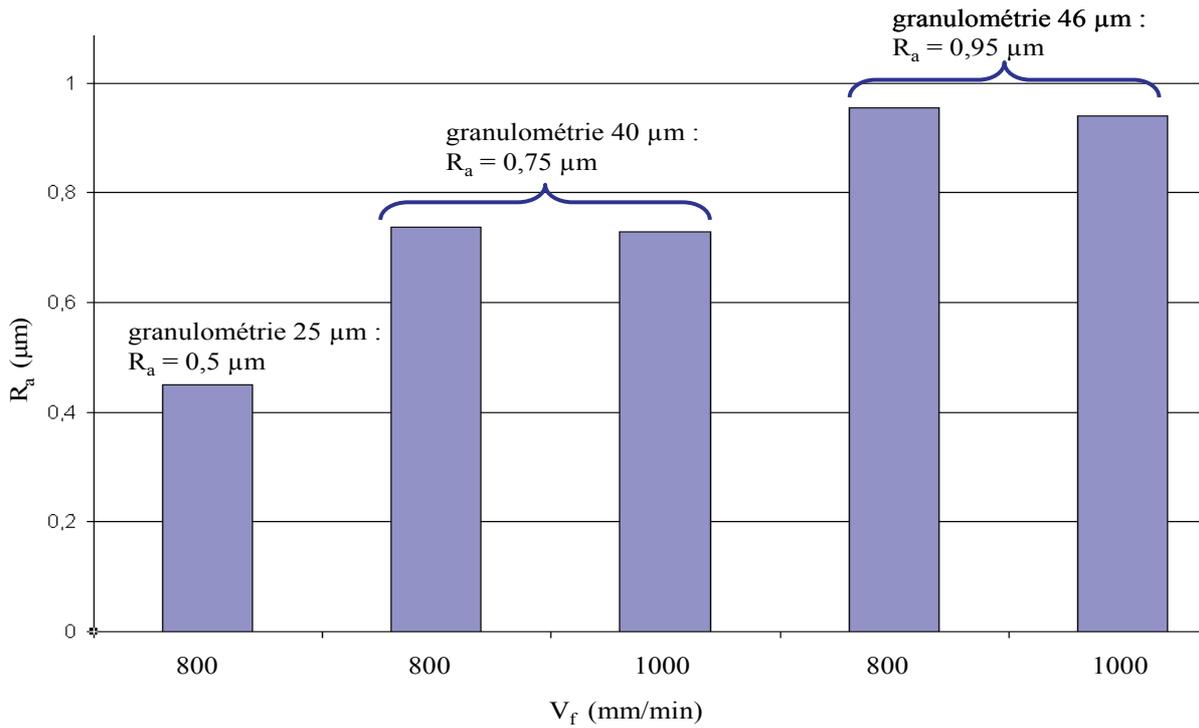


Figure 3-15: rugosité arithmétique moyenne en fonction de la granulométrie et de la vitesse d'avance

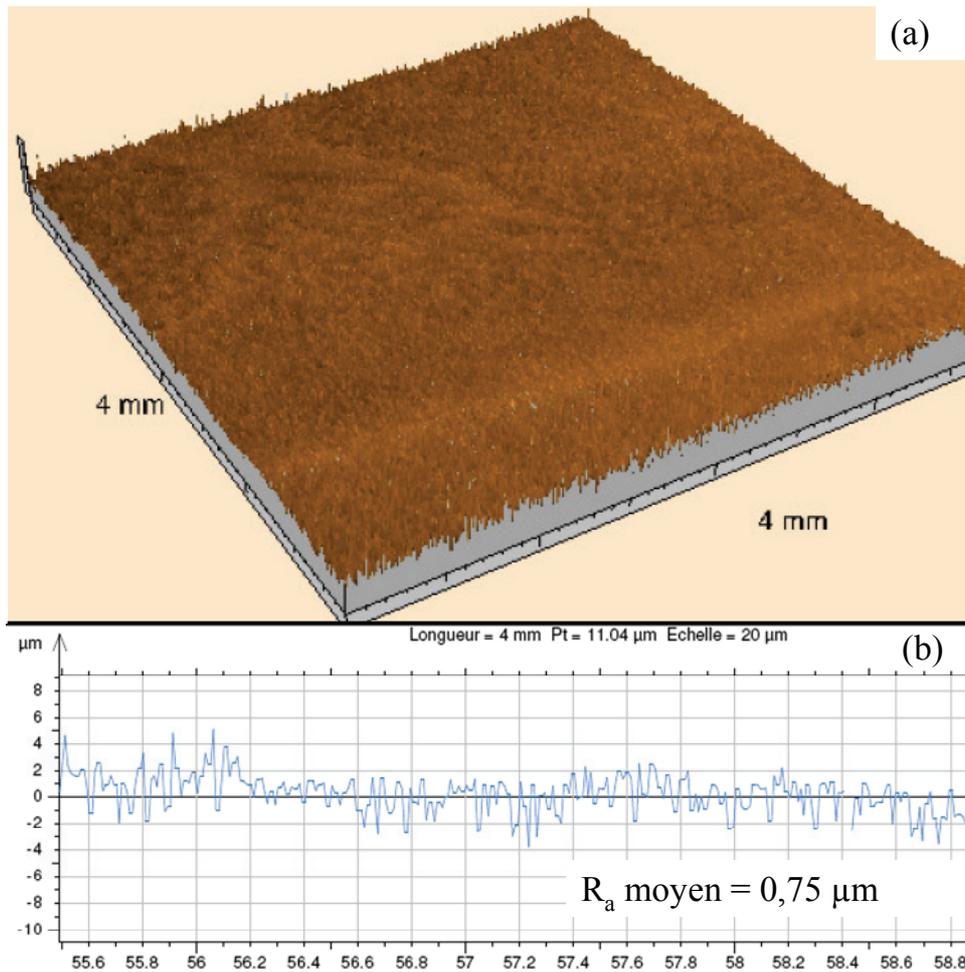


Figure 3-16: surface usinée avec l'outil meule de granulométrie 40  $\mu\text{m}$  mesurée au profilomètre 3D

La tête abrasive de 40  $\mu\text{m}$  étant la mieux adaptée à notre application, les essais visant à quantifier l'usure décrit dans la partie suivante seront donc réalisés avec cet outil.

### 2.7.2. Essais d'usure pour une granulométrie de 40 $\mu\text{m}$

Ses surfaces planes de 140 x 208 mm sont usinées avec la tête abrasive de 40  $\mu\text{m}$ , suivant les paramètres d'usinage donnés dans le Tableau 3-2. Des mesures de rugosité et de défauts de forme sont effectuées pour appréhender l'impact de l'usure d'outil sur ce procédé de meulage (Figure 3-17).

Outil	Angle de dépinçage (°)	$V_c$ (m/min)	$V_f$ (mm/min)	$a_e$ (mm)	$a_p$ (mm)
Granulométrie de 40 $\mu\text{m}$	Longitudinal de 1°	1080	1000	2,7	0,5

Tableau 3-2: paramètres de meulage

Nous pouvons remarquer que l'usure de l'outil meule n'a pas d'influence sur la qualité de surface obtenue, la rugosité reste constante. Au cours de ces essais, une superficie de 0,12  $\text{m}^2$  est usinée pour une distance totale parcourue par l'outil sur la pièce de 44 m. Contrairement aux outils coupants, l'usure n'a pas une influence négative sur la qualité de surface produite. Ce résultat est confirmé par les travaux menés dans la littérature [Childs01], [Zhou02], [Demirci10]. En effet, au cours de son utilisation des grains d'abrasifs sont arrachés à l'outil et laisse apparaître à sa surface de nouveaux grains, l'outil se régénère de façon continue et conserve ainsi son pouvoir d'abrasion.

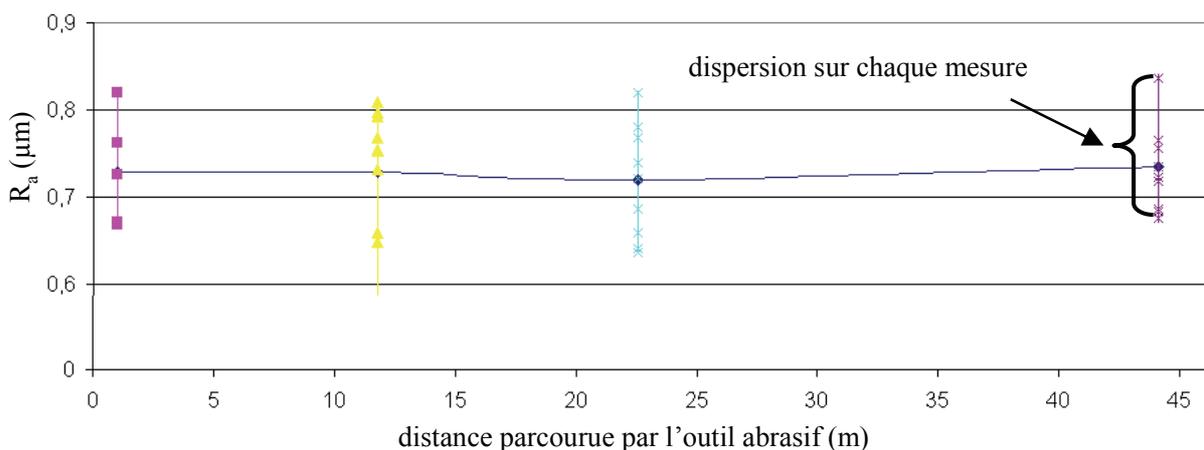


Figure 3-17: rugosité obtenue en fonction de la distance parcourue par l'outil

En contre partie, l'usure engendre une modification du profil de l'outil. Cette modification de la géométrie de l'outil due à l'usure peut être observée sur un banc de préréglage d'outil (Figure 3-18).

Toutefois, la résolution du banc ne nous permet pas de quantifier correctement la modification du profil de l'outil. Cette modification du profil engendre un défaut de forme sur la pièce usinée. Afin de quantifier ce défaut de forme et ainsi pouvoir remonter à la modification du profil de l'outil, un comparateur de résolution de  $2\ \mu\text{m}$  est fixé sur la broche de la machine (Figure 3-19).

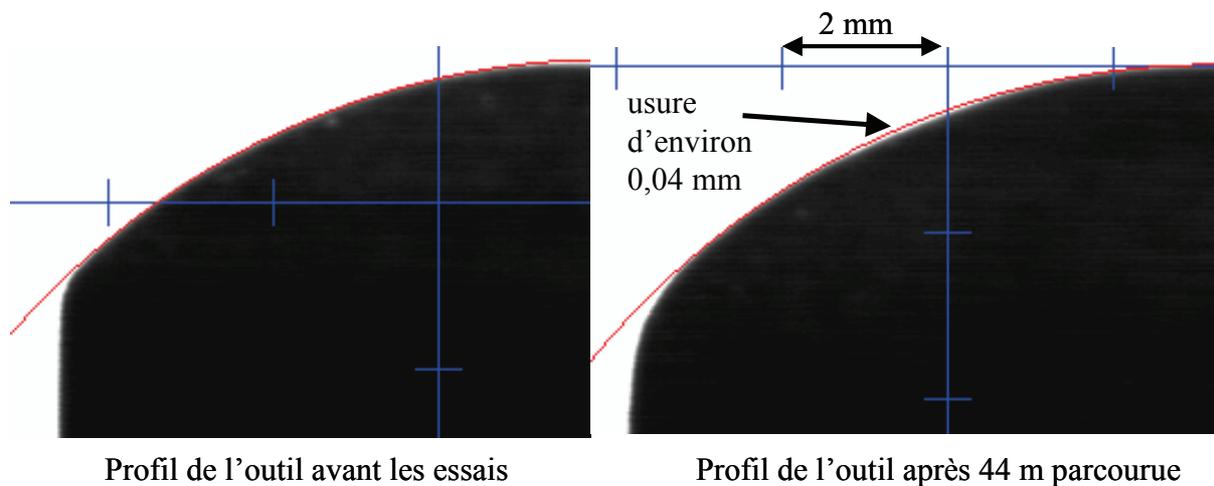


Figure 3-18: usure de l'outil observée au banc de préréglage

Ainsi, une fois la finition à l'outil meule effectuée, le défaut de forme est mesuré en déplaçant la broche au dessus de la surface usinée en conservant la même altitude ( $z$ , axe de la broche constant). Cette méthode permet de mesurer le défaut de forme induit par l'outil directement sur la machine et ainsi de s'affranchir d'éventuels défauts de mise en position dans le cas d'une mesure sur un moyen de métrologie (colonne de mesure ou machine à mesurer tridimensionnelle) et d'éventuels défauts géométriques de la machine. Le balayage lors de la finition est effectué suivant  $Y$ , le défaut de forme est donc mesuré transversalement, suivant l'axe  $X$  (Figure 3-19). Un défaut de forme de  $0,01\ \text{mm}$  est mesuré pour chaque plaque, soit après  $11\ \text{m}$  parcourus. L'évolution du défaut de forme constatée pour les essais menés dans cette étude semble linéaire et être directement proportionnelle à la distance parcourue par l'outil.

Compte tenu des conditions de mesure de ce défaut de forme, nous estimons que cette valeur correspond directement à l'usure de l'outil. Nous remarquons toutefois que seul le défaut de répétabilité de la machine peut influencer cette mesure et nous le négligeons pour la

suite de cette étude. L'outil étant utilisé avec un dépinçage de  $1^\circ$ , l'usure apparaît sur la partie rayonnée, dont le rayon a diminué de 0,04 mm pour l'ensemble des quatre plaques usinées, soit après 44 m parcourus (Figure 3-18).

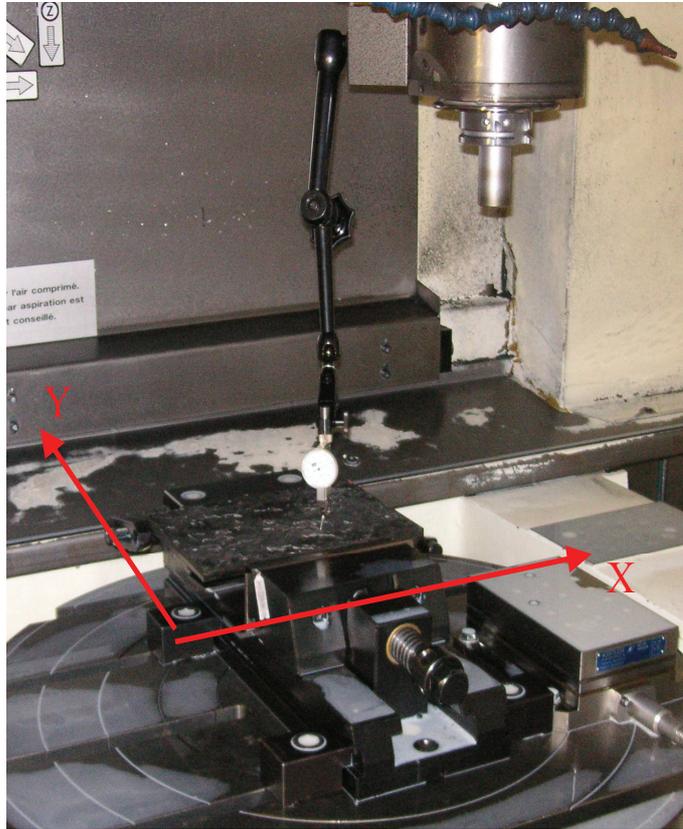


Figure 3-19: mesure du défaut de forme directement sur le centre d'usinage

L'usure des outils abrasifs peut donc engendrer un défaut de forme sur la géométrie de moules usinés qui peut amener à ne pas respecter les spécifications de forme. Toutefois, des actions correctives existent : il est possible de prévoir des opérations d'avivage de l'outil de façon périodique afin de rectifier sa géométrie, solution couramment employée sur les centres de meulage (Figure 3-4). De plus, il est également possible d'utiliser des correcteurs dynamiques de jauges outil pour compenser l'évolution du profil de l'outil. Toutefois, l'utilisation des jauges dynamiques nécessite de connaître précisément l'évolution du profil de l'outil. Or dans le cas d'une géométrie réelle de moule, la partie de l'outil en contact avec la pièce évolue en fonction de la géométrie et de l'angle de dépinçage utilisée. Pour prédire avec certitude l'évolution du profil de l'outil, il est nécessaire de connaître la position du point de contact entre l'outil et la pièce. La solution de correction de l'outil par avivage semble donc être la solution à privilégier.

### 3. Conclusion

Les travaux menés au Chapitre 2 montre qu'il est impossible actuellement d'atteindre les objectifs industriels de qualité de surface ( $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ ) pour les moules en Hextool™ avec un outil coupant. Ce constat nous a conduits à nous intéresser à l'automatisation de l'opération de parachèvement. L'état de l'art réalisé en début de chapitre a permis de privilégier une solution de meulage sur un centre d'usinage. Ce choix est motivé par la simplicité de mise en œuvre et la productivité accrue comparées aux solutions de polissage sur robot anthropomorphe ou sur centre d'usinage. Afin de valider l'efficacité et la faisabilité d'une finition par meulage de moules en matériaux composites, un outil prototype est spécialement conçu en partenariat avec la société Asahi Diamond Industrial Europe. L'outil meule développé à une géométrie proche de celle d'une fraise torique, adapté à l'usinage de forme.

Ces essais permettent de démontrer la faisabilité d'une telle opération. De plus cette technologie permet d'atteindre une rugosité arithmétique moyenne de  $0,5 \mu\text{m}$  pour une granulométrie de  $25 \mu\text{m}$ , ce qui élimine l'opération de polissage manuel. L'outil meule a la capacité de tolérer des variations de prise de passe axiale de  $0,07$  à  $0,87 \text{ mm}$ , sans dégrader l'état de surface. Cette propriété est intéressante car elle évite d'imposer des contraintes particulières à l'opération d'usinage de finition. D'autre part, la productivité de ce procédé de meulage est en partie validée. En effet, des vitesses d'avance jusqu'à  $1200 \text{ mm/min}$  sont testées sans impact sur la qualité de surface produite. Les gains de productivité sont discutés plus en détails lors de l'étude technico-économique menée au Chapitre 4. Enfin, la tenue à l'usure des outils abrasifs est discutée. L'usure n'affecte pas la qualité de surface produite, cependant elle peut engendrer des défauts de forme sur le moule usiné. Néanmoins, il existe des actions correctives, notamment l'avivage qui permettent de corriger le profil de l'outil meule.

Les travaux menés dans les Chapitres 2 et 3 apportent des éléments de réponse sur l'opération de finition par outil coupant et abrasif. Le Chapitre 4 s'intéresse aux opérations d'ébauche et de semi-finition. L'impact de ces opérations sur le choix de la machine, des opérations d'usinage et des outils est discuté. Enfin, une étude technico économique permet d'observer l'influence du procédé de finition choisie sur la productivité globale de la gamme.

## **Chapitre 4 Gamme d'usinage d'un moule en Hextool™**

L'usinage est une étape indispensable à la réalisation d'un moule en Hextool™. En effet, cette opération permet de donner à l'outillage ses dimensions finales. De plus, les exigences d'état de surface pour les outillages en matériaux composites sont importantes, en effet une rugosité arithmétique de  $0,8 \mu\text{m}$  est attendue. L'étude menée au Chapitre 2 permet de montrer que les outils coupants en PCD ne permettent pas d'atteindre les valeurs attendues. Une étape de polissage manuelle demeure donc indispensable après un usinage de finition par outil coupant. Cette étude permet, de plus, de mettre en évidence une valeur de prise de passe radiale qui optimise le ratio état de surface / temps d'usinage. Afin de réduire, voire de supprimer l'opération de polissage manuelle, des travaux sur la conception d'outils meules sont menés dans le chapitre 3, collaboration avec Asahi Diamond Industrial Europe. Les travaux menés valident l'aptitude à atteindre un état de surface satisfaisant.

Cependant avant de réaliser l'opération de finition par outil coupant ou abrasif, il est indispensable de réaliser une opération de semi-finition et éventuellement une opération d'ébauche. Pour effectuer ces usinages préalables, il est nécessaire de choisir les outils, la gamme et la machine d'usinage adaptés aux contraintes liées à l'usinage d'un moule en matériaux composites. Les choix possibles pour ces trois points peuvent être résumés par le triptyque de la Figure 4-1. Pour les outils, ces choix concernent le matériau de coupe (carbure de tungstène, PCD ou abrasif diamant) et leur géométrie. Pour la gamme, le choix d'une opération d'ébauche est discuté et les différentes stratégies d'usinage possibles pour la semi-finition et la finition sont passées en revue. Enfin, concernant la machine, le choix d'une

architecture et d'un système de traitement des poussières liées à la coupe est commenté. Les travaux menés dans ce chapitre permettent d'apporter des réponses sur les choix à effectuer et de mettre en évidence les interactions existantes.

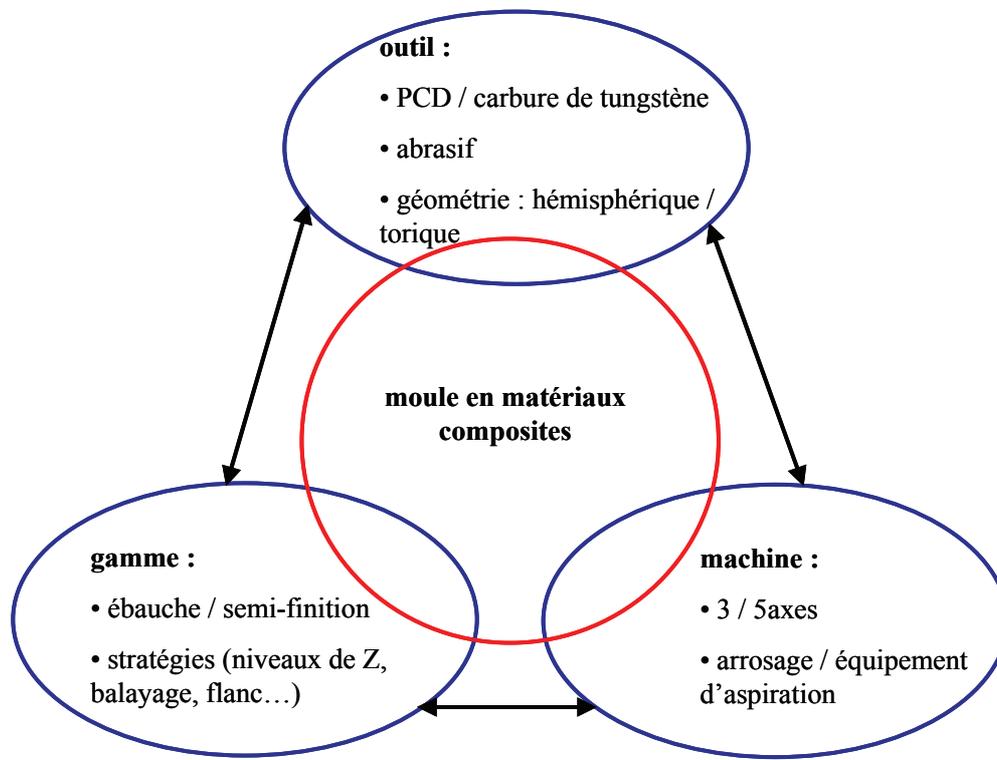


Figure 4-1: triptyque de l'usinage de moules en matériaux composites

Dans un premier temps, la problématique de l'usinage d'ébauche en Hextool™ est présentée. La détermination de la puissance consommée, des pressions spécifiques de coupe et différents essais permettent de proposer des technologies d'outil et des stratégies d'usinage adaptées à l'usinage des moules en matériaux composites. Par la suite, l'impact de l'usinage de moules en Hextool™ sur le choix d'une machine outil adaptée est discuté avec une attention particulière sur le choix de l'architecture de la machine.

## 1. Typologie des pièces usinées

Les pièces fabriquées en composites sont soit des pièces de peaux, pour lesquelles le poids est le critère prépondérant du choix du matériau, soit des pièces de structure, pour lesquelles le rapport résistance mécanique / poids est le critère prépondérant de choix. Le procédé RTM est avant tout utilisé pour fabriquer des pièces de structure. Les moules présentent donc une géométrie spécifique adaptée.

Une pièce de structure est une pièce qui a pour but de transmettre un flux d'effort au niveau de la structure de l'avion. Géométriquement, elle présente des formes simples qui permettent de relier les points de fixation à la structure. Mécaniquement ses formes sont dimensionnées pour transmettre les efforts.

Ainsi, les pièces de structure sont des pièces conçues à partir d'entités géométriques simples comme des poutres de forme A, U ou autres. La complexité du moule est liée au positionnement relatif des entités élémentaires et non à la complexité intrinsèque des formes. La Figure 4-2 suivante présente une vue d'une poutre en « A » fabriquée par la société SKF Aerospace. Le moule nécessaire à cette pièce est peu profond, de l'ordre de 10 mm, il sera donc à priori usiner à partir d'un brut parallélépipédique.

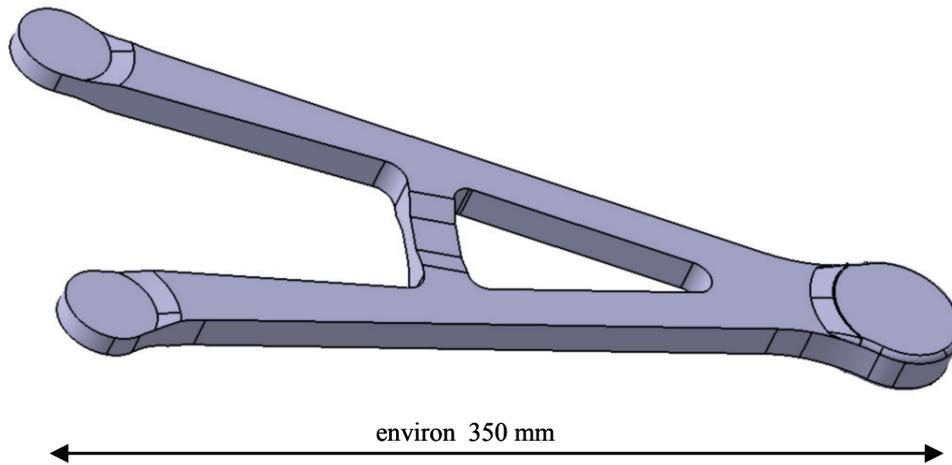


Figure 4-2: poutre en A (démonstrateur industriel SKF Aerospace)

La Figure 4-3 présente le démonstrateur industriel de la société Isoire Aviation. Il s'agit d'une poutre en « U » de dimensions conséquentes. Le moule en Hextool™ nécessaire à cette pièce sera à priori réaliser par drapage de préimprégnés sur un maitre modèle.

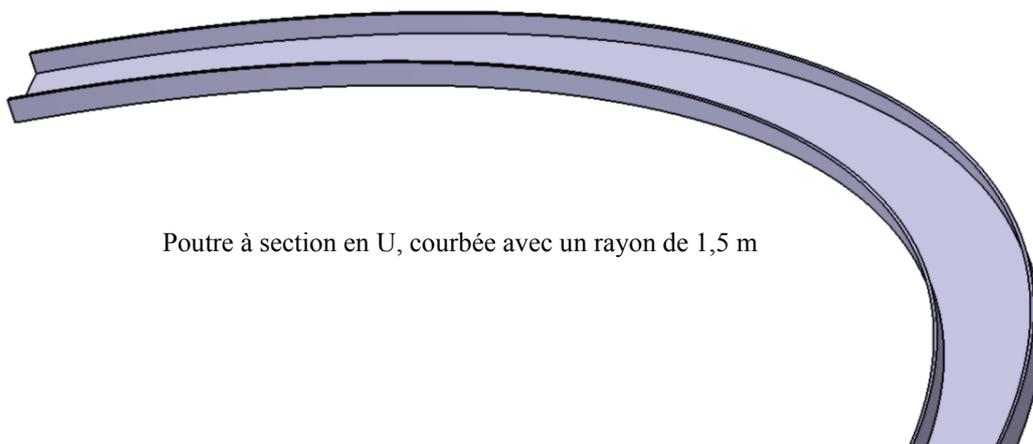


Figure 4-3: poutre en U (démonstrateur industriel d'Isoire Aviation)

L'analyse géométrique des formes permet d'identifier des formes « quasi planes », « quasi verticales » et des congés de raccordement (Figure 4-4).

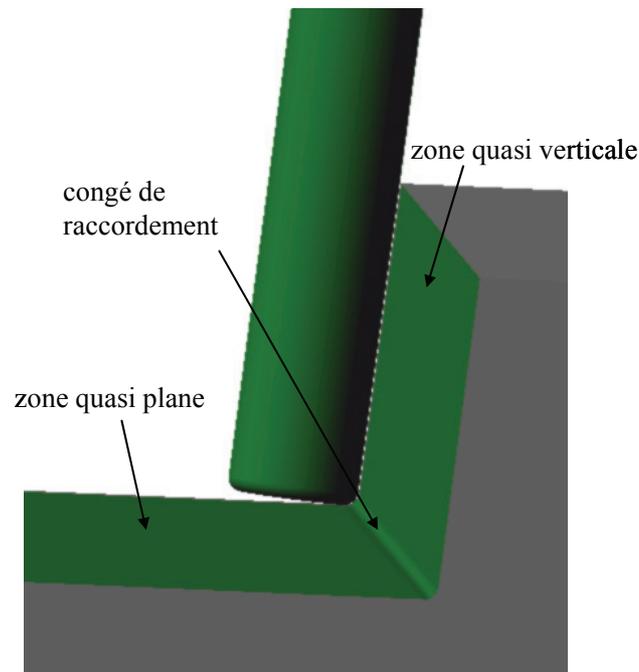


Figure 4-4: analyse locale de la géométrie des moules

De plus, pour pouvoir injecter la résine nécessaire à l'obtention d'une pièce en RTM, des opérations d'usinage particulières doivent être réalisées sur le moule et notamment sur le démonstrateur de laboratoire du projet LCM-Smart (Annexe). Il s'agit d'opérations de rainurage, de lamage, de perçage et de taraudage. En effet, la plaque inférieure présente un insert qu'il est nécessaire de pouvoir démonter pour retirer la carotte d'injection après cuisson de la résine thermodurcissable (Figure 4-5).

Les opérations de rainurage sont réalisées avec des fraises droites ou hémisphériques monobloc en PCD. Les lamages sont réalisés en interpolation hélicoïdale avec une fraise droite en PCD. Les conditions de coupe utilisées sont énoncées par la suite et aucun phénomène de délaminage ou d'arrachement n'est observé. Les perçages sont réalisés avec des forets en acier rapide dont la géométrie et les conditions de coupe sont identiques à leur emploi dans les alliages d'aluminium. Aucun délaminage n'est constaté en entrée de trou et un délaminage léger est observé en sortie. Cependant, compte tenu de la gamme, les faces comprenant des perçages débouchant sont réusinées après perçage. Cette solution est donc satisfaisante pour notre application. Enfin, le taraudage de l'Hextool™ est impossible mais l'emploi d'inserts taraudeurs permet d'obtenir de façon rapide des trous taraudés résistants.

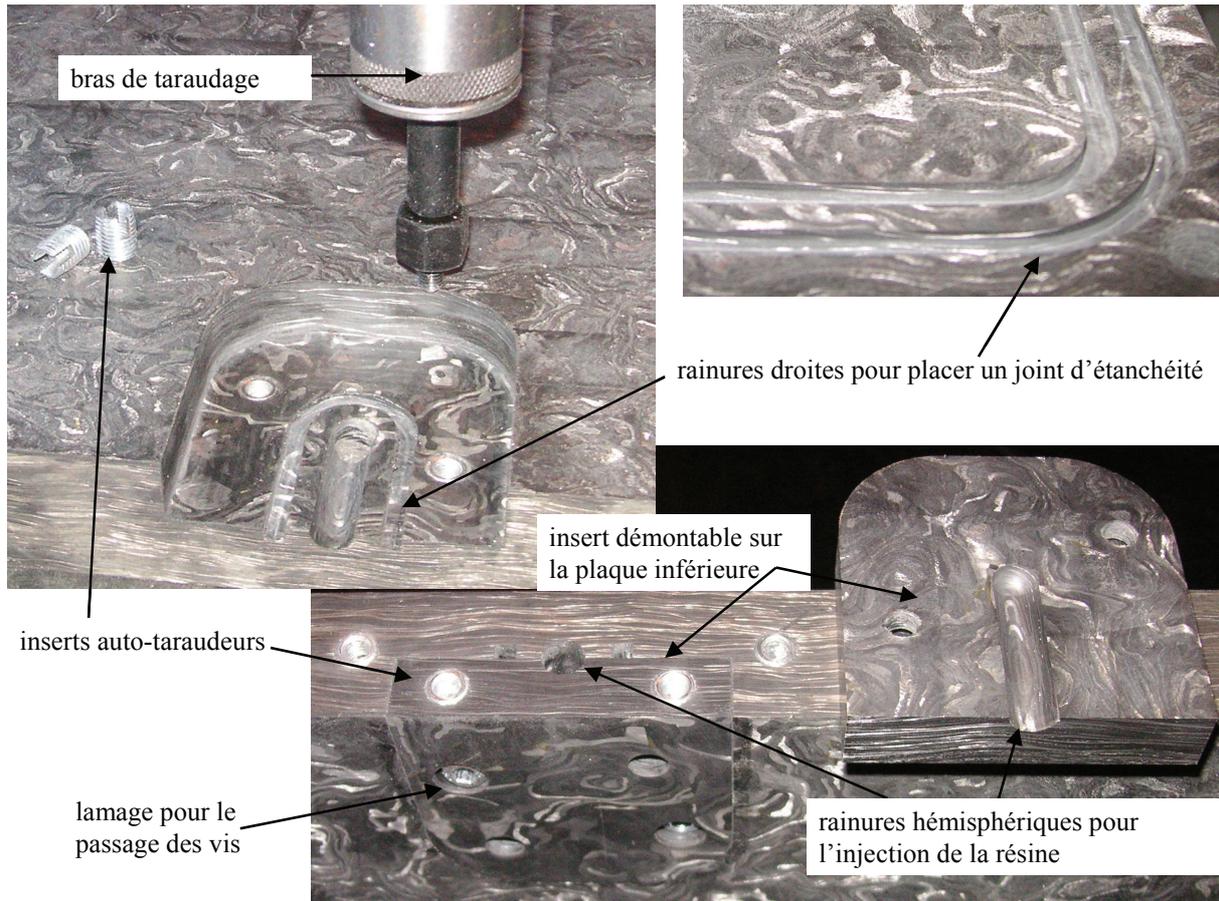


Figure 4-5: géométries particulières d'un outillage en Hextool™

## 2. Problématique de l'usinage de moule en Hextool™

La fabrication d'un moule est une opération complexe qui fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature [Altan01], [Bouaziz04], [Toh05], [Lee06].

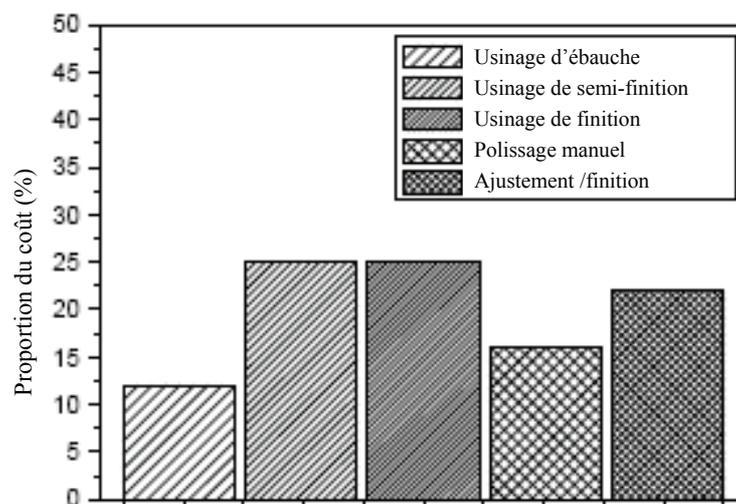


Figure 4-6: proportion des coûts de fabrication pour un moule métallique [Lee06]

Dans le cas de moules métalliques, en alliage d'aluminium ou acier, la gamme de fabrication est composée d'opérations d'ébauche, de semi-finition, de finition, de polissage et d'ajustement finition suivant une proportion de coût donnée dans la Figure 4-6.

Les moules en acier sont obtenus à partir d'un brut non préformé, ce qui n'est pas le cas pour les moules en Hextool™. En effet, compte tenu du coût élevé du matériau composite, un brut préformé proche de la géométrie finale est réalisé (Figure 4-7). Les moules en Hextool™ étant dédiés au procédé RTM pour des pièces aéronautiques de grande dimension, la plupart des moules sont réalisés à partir d'une préforme. Toutefois, si la pièce est de faible épaisseur alors l'empreinte du moule est peu profonde, et le moule peut être usiné directement dans un brut sans préforme. Suivant les dimensions de la pièce à réaliser et les contraintes exercées sur le moule, l'épaisseur du moule fini est comprise entre 20 et 50 mm. L'épaisseur de matière à retirer pour obtenir les dimensions finales du moule est d'environ 10 mm.

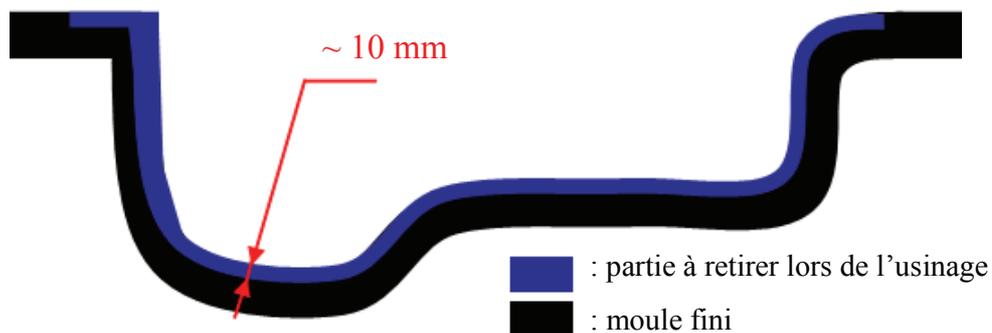


Figure 4-7: préforme du moule en Hextool™

Cette surépaisseur de matière à retirer pour atteindre les dimensions finales est essentiellement justifiée par les variations d'épaisseur constatées après cuisson sur la face libre de la préforme du moule. En effet, le moule est constitué d'un empilage de 15 à 40 plis de rubans de préimprégnés, suivant les contraintes subies par l'outillage. Toutefois, compte tenu de l'orientation aléatoire des renforts fibreux en carbone, l'épaisseur de chaque pli n'est pas uniforme, elle varie de 1 à 1,6 mm pour une valeur moyenne de 1,3 mm. Cette épaisseur variable des plis, ajoutés aux déformations générées lors de la réticulation de la résine thermodurcissable engendre des ondulations, de 5 à 10 mm d'épaisseur, sur la face libre du moule préformé (Figure 4-8), pour une épaisseur de moule finale comprise entre 20 et 50 mm.

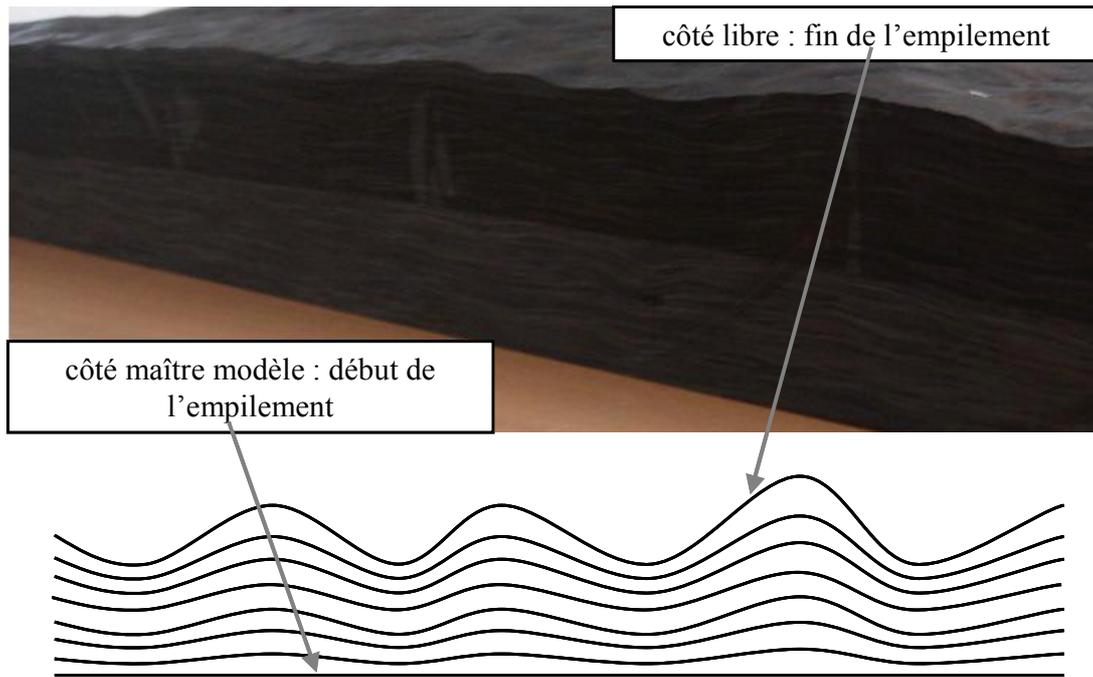


Figure 4-8: phénomène d'ondulation sur le côté libre de la matière du à l'empilement

Dans ces conditions, nous envisageons de supprimer l'opération d'ébauche pour les moules en matériaux composites afin de réaliser uniquement une opération de semi-finition, pour réaliser un gain de productivité important.

### 3. Choix d'outils adaptés à la semi-finition

La prise de passe axiale  $a_p$  à retirer lors de l'opération de semi-finition est conséquente (environ 10 mm). Afin de valider la suppression de l'opération d'ébauche, différents essais sont conduits pour juger de la capacité des outils et du centre d'usinage à tolérer une telle prise de passe axiale, à partir de relevés de puissance consommée en usinage.

#### 3.1. Essais de puissance consommée

Les essais de fraisage sont conduits sur un centre d'usinage Huron KX15, équipée d'une électro-broche de 15 kW. L'usinage est réalisé à sec et un dispositif d'aspiration permet de récupérer les poussières générées par la coupe (Figure 4-9).

Trois outils différents sont utilisés : une fraise (a) Sandvik R790 à plaquettes rapportées en carbure de tungstène de 25 mm de diamètre (Figure 4-10 (a)), une fraise (b) en carbure de tungstène monobloc Sandvik de diamètre 10 mm (Figure 4-10 (b)) et une fraise (c) à insert PCD brasé, de diamètre 10 mm, fabriquée par Asahi Diamond Industrial Europe (Figure 4-10 (c)).



Figure 4-9: essais de puissance sur Huron KX15 avec dispositif d'aspiration

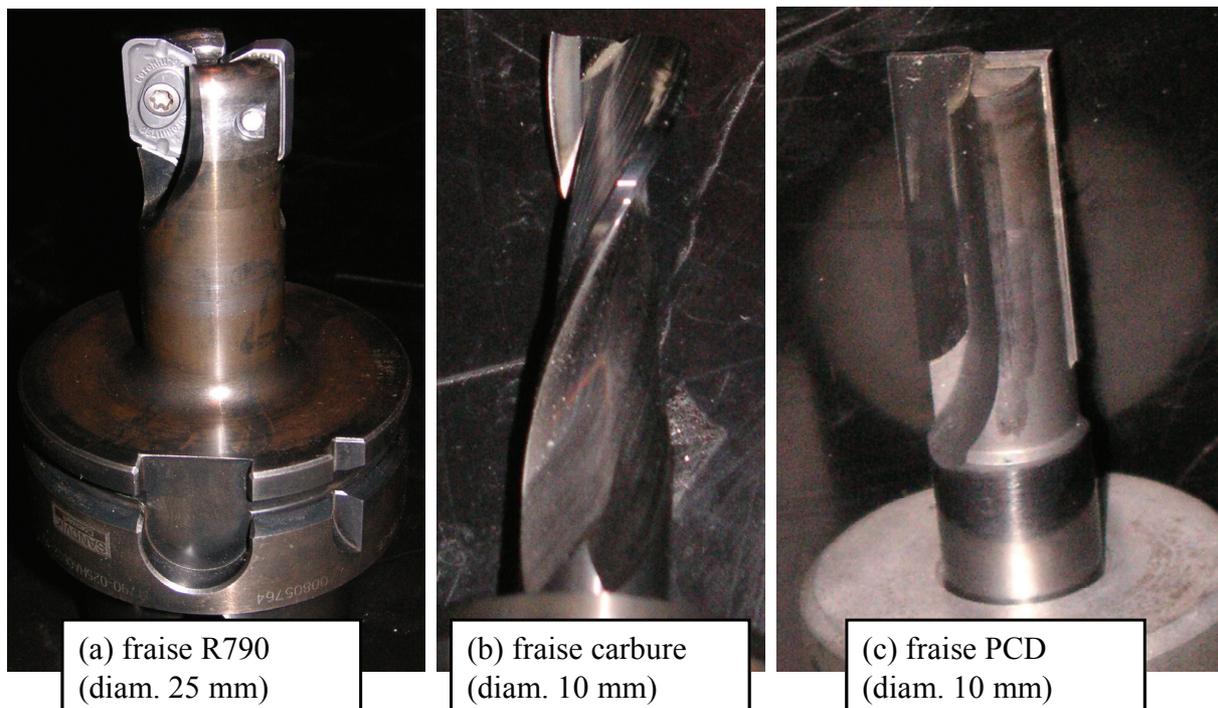


Figure 4-10: outils utilisés pour les relevés de puissance

Les conditions de coupe, la puissance consommée et la pression spécifique de coupe  $K_c$  calculée à partir des valeurs de puissance apparaissent dans le Tableau 4-1. En effet, lors de la coupe, la puissance consommée est essentiellement due aux efforts de coupe. Durant les essais, l'essai 1 du Tableau 4-1 permet d'estimer la puissance à vide consommée par la broche  $P_{vide}$  à 1,3 kW [Cordebois03]. Ainsi la puissance consommée par la coupe s'exprime par l'équation (7). La pression spécifique de coupe s'exprime par l'équation (8), avec  $D$  le

diamètre de l'outil [Sandvik97]. Le terme de droite dans l'équation (8) permet d'ajuster la pression spécifique de coupe en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau.

$$P_c = P_m - P_{vide} \quad (7)$$

$$K_c = \frac{P_c}{V_c \cdot a_p \cdot f_z} \cdot \left( \frac{0,2}{f_z \sqrt{\frac{a_e}{D}}} \right)^{0,29} \quad (8)$$

Le calcul de la pression spécifique de coupe permet de vérifier la cohérence des valeurs de puissance mesurée et de pouvoir comparer les efforts générés par la coupe de l'Hextool™ par rapport aux alliages d'aluminium et aux aciers.

outil	Engagement radial (%)	$a_p$ (mm)	N (tr/min)	$V_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/tr/dent)	$V_f$ (m/min)	$P_m$ (kW)	$K_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	remarque
(a)	0	0	15000	0	0	0	1,3(=P <sub>vide</sub> )	0	Essai 1 (à vide)
(a)	70	5	15000	1180	0,1	3	3,6	299	Essai 2
(a)	70	10	15000	1180	0,1	3	5,9	301	Essai 3
(a)	100	5	15000	1180	0,2	6	9,1	396	Essai 4
(a)	100	10	15000	1180	0,2	6	15	347	Essai 5 (calage)
(a)	70	10	15000	1180	0,15	4,5	9	299	Essai 6
(b)	100	10	15000	470	0,1	3	3,4	317	Essai 7
(c)	100	10	15000	470	0,1	3	2,3	152	Essai 8

Tableau 4-1: conditions de coupe et puissances consommées

Les essais sont réalisés avec un engagement radial variant de 70 à 100 % du diamètre de l'outil ce qui correspond aux valeurs couramment utilisées lors de l'usinage d'un moule. Nous remarquons que pour l'outil (a, R790), la valeur de  $K_c$  est constante et vaut environ 300 N/mm<sup>2</sup> pour un engagement radial de 70 % et environ 390 N/mm<sup>2</sup> pour un engagement de 100 %. Cette différence s'explique par le fait que la pression spécifique est déterminée à partir d'un relevé de puissance moyenne consommée. Lors d'un engagement à 100 % les dents de l'outil restent plus longtemps en prise avec la matière lors d'un tour de fraise, ainsi la puissance moyenne consommée est plus importante. Toutefois, nous remarquons une bonne cohérence vis-à-vis du modèle de puissance lors des variations de  $a_p$  et  $f_z$ . La pression

spécifique de coupe obtenue pour l'outil (b, carbure monobloc) vaut  $317 \text{ N/mm}^2$  alors que l'engagement radial est de 100 %. Cette différence s'explique par la géométrie de l'outil monobloc qui est différente de celle de l'outil à plaquette rapportée notamment au niveau de l'angle d'hélice (Figure 4-10). Toutefois, ces valeurs de pression spécifique restent cohérentes et aux environs de  $300 \text{ N/mm}^2$  pour un outil en carbure de tungstène.

D'autre part, la pression spécifique de coupe obtenue pour l'outil (c), à inserts PCD brasés, est nettement plus faible et vaut  $152 \text{ N/mm}^2$ . En effet, les outils en PCD présentent une plus grande acuité d'arête et induisent une coupe plus franche nécessitant moins d'efforts et d'arrachements [Davim05a], [Davim05b].

Les valeurs de pression spécifique déterminées, dans ces essais sont en accord avec les valeurs d'efforts obtenues au cours d'autres travaux sur l'usinage de l'Hextool™ [Fayard09]. Par ailleurs ces valeurs sont faibles comparées aux pressions spécifiques des alliages d'aluminium ( $\approx 900 \text{ N/mm}^2$ ) et des aciers (compris entre  $2000$  et  $3000 \text{ N/mm}^2$ ) [Cordebois03]. Ces faibles valeurs de pression spécifiques pour l'Hextool™ conduisent à des puissances consommées compatibles avec la plupart des électro-broches rencontrées dans les ateliers de fabrication de moule. La réalisation d'une opération de semi-finition sans opération d'ébauche préalable semble donc tout à fait réalisable du point de vue de la puissance consommée. La suppression de l'opération d'ébauche permet un gain en coût d'environ 12 % (Figure 4-6), [Lee06]. Toutefois, pour réaliser cette opération de semi-finition avec une prise de passe axiale pouvant aller jusqu'à 10 mm, il est essentiel d'effectuer des choix d'outil coupant et de stratégie d'usinage adaptées.

### **3.2. Aptitude des outils PCD à l'usinage de moule en Hextool™**

La littérature et les essais de puissance réalisés précédemment montrent que les outils PCD génèrent une coupe plus franche, nécessitant moins d'efforts et de puissance et entraînent de meilleurs états de surface que les outils en carbure de tungstène. De plus, la grande dureté du diamant confère à ces outils une durée de vie largement supérieure à celle des outils en carbure de tungstène [Davim05], [Palanikumar08].

Cependant, les outils à plaquettes rapportées avec inserts en PCD présentent une profondeur de passe axiale maximale limitée à 5 mm (Figure 4-11). Cette valeur n'est pas compatible avec la prise de passe axiale de 10 mm nécessaire pour réaliser la semi-finition en une seule passe. Mais le PCD peut rester plus productif en usinage à passes multiples, si on

réduit drastiquement la vitesse de coupe des outils en carbure de tungstène pour contrôler l'usure.

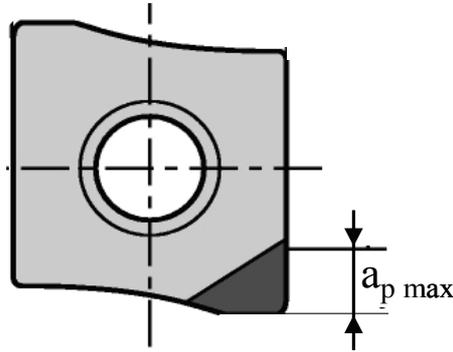


Figure 4-11: plaquette Sandvik R590 à insert PCD ( $a_{pmax} = 5 \text{ mm}$ )

D'autre part, les outils en PCD monobloc à inserts brasés peuvent présenter une hauteur de coupe supérieure à 10 mm (Figure 4-10). Néanmoins, à diamètre identique le prix d'un outil en PCD est en moyenne trois fois plus élevés pour une technologie monobloc et sept fois plus élevés dans le cas d'un outil à plaquettes rapportées en carbure de tungstène. Le prix élevé des outils en PCD, est donc un frein à leur utilisation en semi-finition. Ils demeurent néanmoins un choix de référence pour les opérations de finition grâce à la qualité de coupe et aux faibles rugosités obtenues (cf. Chapitre 2). Une vitesse de coupe de 1200 m/min, une avance à la dent de 0,1 mm et une prise de passe axiale de 0,5 mm peuvent être considérées comme des paramètres de référence pour la finition. La prise de passe radiale optimale est déterminée suivant les travaux du Chapitre 2.

### 3.3. Aptitude des outils en carbure de tungstène

Dans cette partie, différents essais de semi-finition et de finition avec différentes technologies d'outil en carbure permettent de proposer un choix d'outil de référence.

#### 3.3.1. Aptitude aux opérations de semi-finition

Au cours de nos travaux, différentes pièces aux géométries variées sont usinées avec de outils en carbure de tungstène monobloc et à plaquettes rapportées. Nous pouvons constater sur la Figure 4-12 et la Figure 4-13 que l'opération d'ébauche engendre de nombreux arrachements et des fibres non coupées.

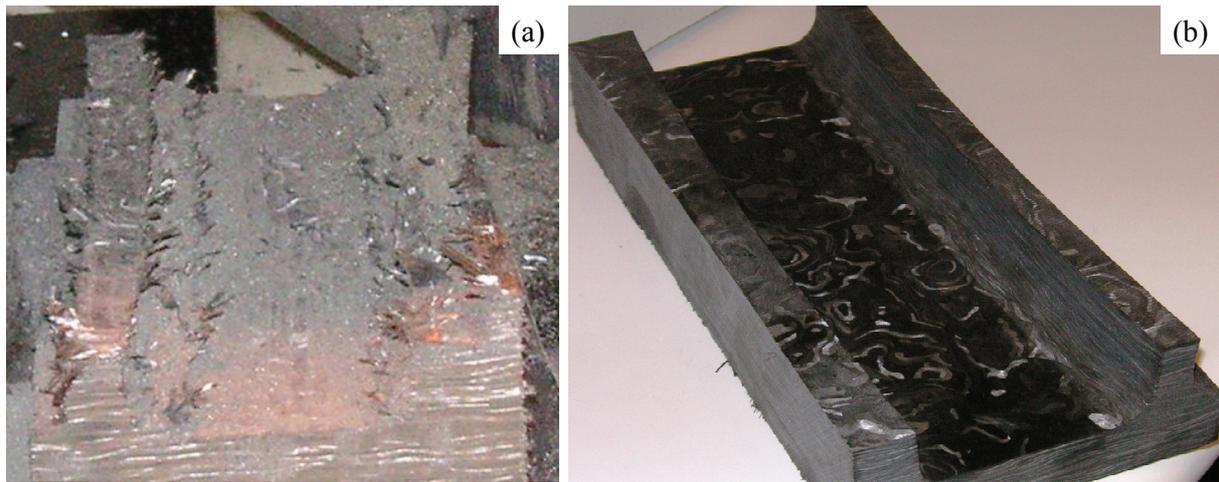


Figure 4-12: (a) pièce en cours d'ébauche ; (b) pièce après l'opération de finition

Cependant, les phénomènes d'arrachements et de fibres non coupées restent en surface et n'endommagent pas le matériau en profondeur. La Figure 4-13 montre une pièce partiellement usinée en finition avec une surépaisseur de 0,5 mm laissée à l'ébauche. Malgré l'état chaotique de la pièce après l'ébauche, l'état de surface obtenu après la finition est satisfaisant et aucun défaut n'est constaté visuellement. Une surépaisseur de 0,5 mm peut donc être considérée comme une valeur de référence.

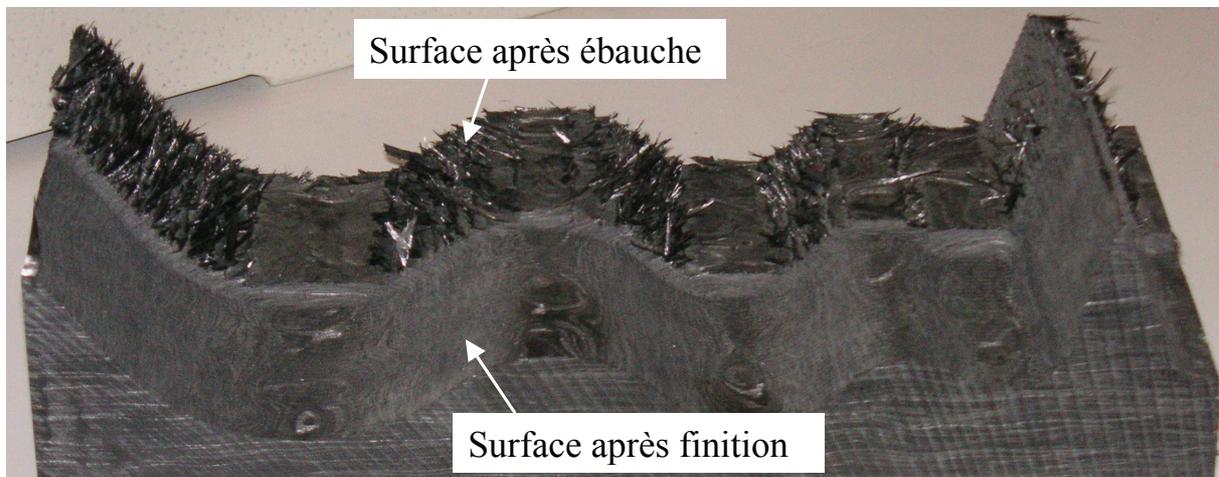


Figure 4-13: pièce usinée avec un outil en carbure après l'ébauche et après la finition

Ces arrachements et ces fibres non coupées lors de l'opération d'ébauche sont nettement moins prononcés lorsque l'opération est réalisée avec une fraise en PCD. Cette différence s'explique par la grande dureté du diamant et par le fait que ces outils conservent dans le temps une bonne acuité d'arête générant ainsi une coupe plus franche nécessitant moins d'efforts.

### 3.3.2. Aptitude aux opérations de finition

Des essais de finition de pièce en Hextool™ avec des outils monoblocs et à plaquettes rapportées sont réalisés (Figure 4-12 (b), Figure 4-13 et Figure 4-14 (a)). Des outils hémisphériques et toriques sont utilisés pour ces opérations de finition suivant une stratégie d'usinage par balayage en plans parallèles. Les prises de passe radiale sont déterminées de façon à générer une rugosité arithmétique théorique inférieure à la valeur seuil identifiée au cours des travaux du Chapitre 2. Ainsi, le motif laissé par l'outil sur la pièce lors du balayage n'a pas d'impact sur les valeurs de rugosité mesurées.

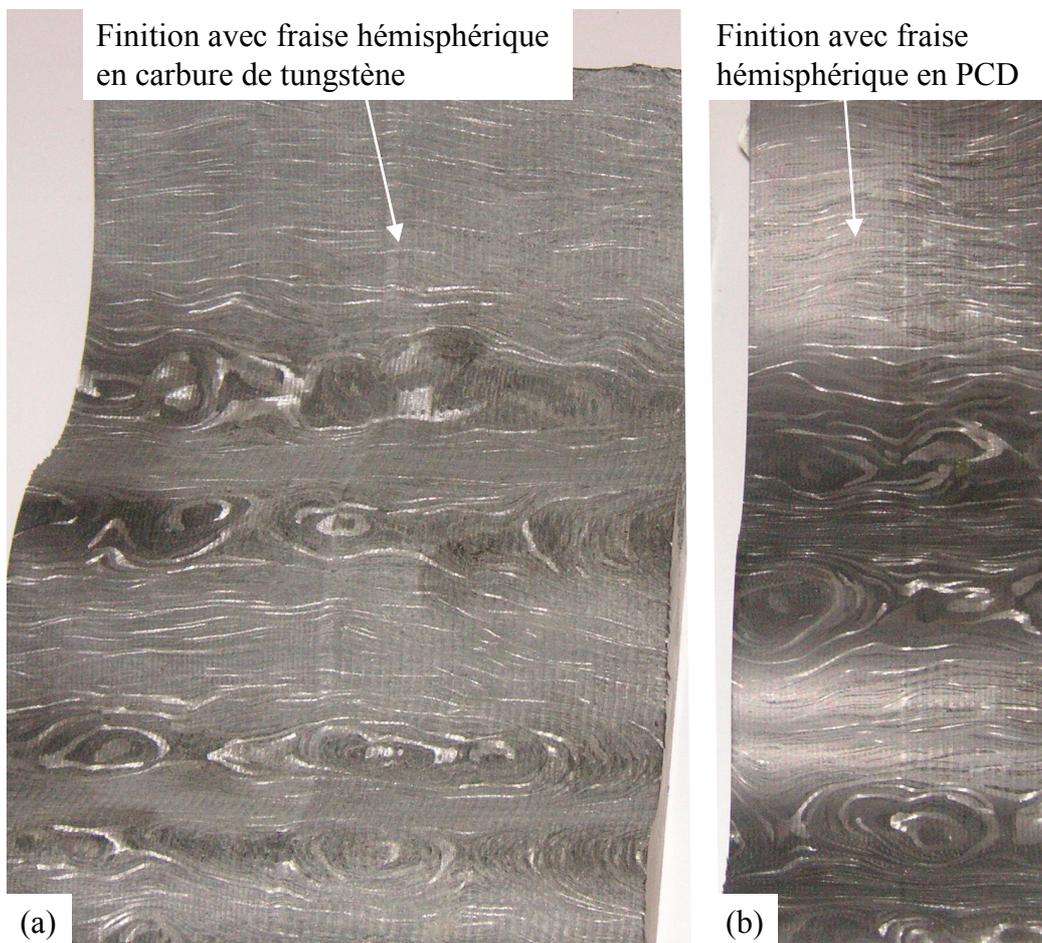


Figure 4-14: pièce usinée avec une fraise hémisphérique en carbure de tungstène (a) et en PCD (b)

Les valeurs moyennes de rugosité arithmétique mesurées sur ces pièces finies avec une fraise en carbure sont comprises entre 3 et 5  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs sont largement supérieures à celles constatées lors d'une finition avec une fraise en PCD, mesurées entre 1,8 et 2,2  $\mu\text{m}$  dans le Chapitre 2. Cette différence de rugosité produite est illustrée par la pièce de la Figure 4-14. En effet, la même géométrie est usinée avec les mêmes paramètres de coupe ( $N = 16000$  tr/min,  $V_f = 3,2$  m/min,  $a_e = 0,3$  mm et  $a_p = 0,5$  mm) avec deux fraises hémisphériques de

diamètre 10 mm : l'une est en carbure de tungstène, l'autre en PCD. Sur la pièce (a) la rugosité arithmétique moyenne mesurée vaut  $4,5 \mu\text{m}$  alors qu'elle vaut  $1,8 \mu\text{m}$  pour la pièce (b). Cette différence peut être constatée visuellement, la pièce (b) est moins mate et réfléchit mieux la lumière.

### 3.3.3. Usure des outils

Au cours des différents essais d'usinage conduits dans le cadre de ces travaux, un émoussement de l'arête de coupe est constaté sur les outils en carbure de tungstène (Figure 4-15). Cet émoussement de l'arête de coupe entraîne une perte de l'acuité d'arête et engendre une coupe moins franche synonyme de rugosité médiocre [Davim05a], [Davim05b].

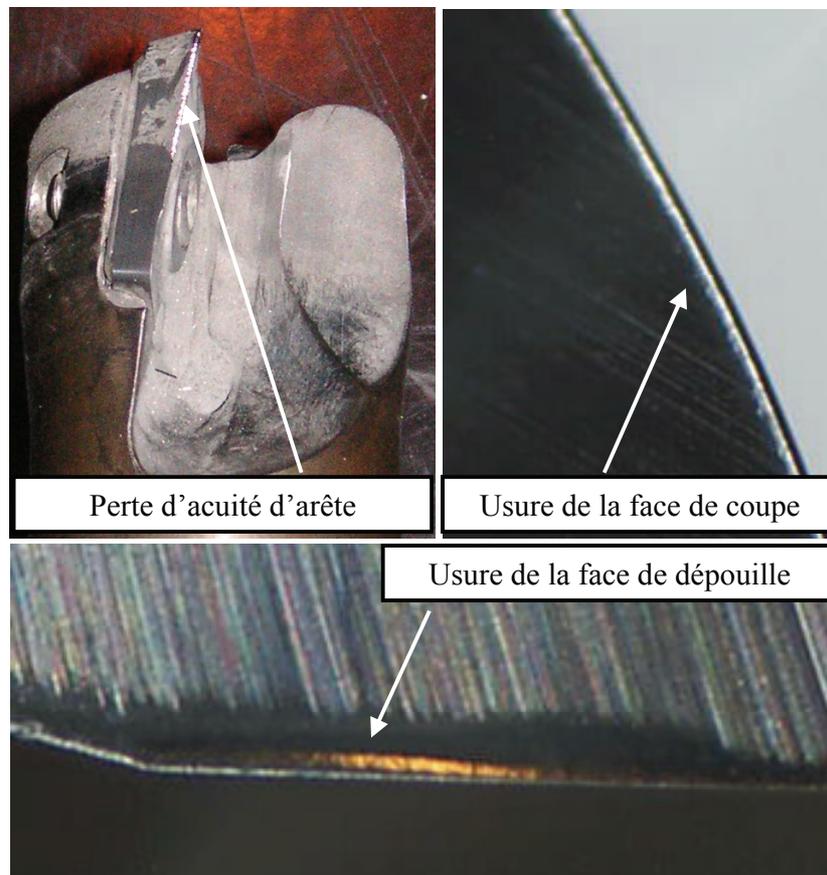


Figure 4-15: perte d'acuité d'arête et usure constatée sur les outils en carbure de tungstène

Cette perte d'acuité d'arête se manifeste après quelques dizaines de seconde d'usinage puis se stabilise. Une perte d'acuité d'arête apparaît également avec les outils en PCD mais de façon beaucoup plus lente permettant de produire une rugosité constante en cours d'usinage (cf. Chapitre 2). Le problème de la définition d'une vitesse de coupe optimale reste un problème ouvert [Davim05b], [Palanikumar07a]. Alors que l'acuité d'arête est communément considérée comme le critère d'usure, la valeur limite du critère reste indéterminée, d'une part.

D'autre part, l'impact de l'usure de l'outil sur le processus d'usinage est réduit à une augmentation de l'échauffement et à une dégradation de la rugosité, qui ne dégrade pas l'état de surface après meulage. Par conséquent, la valeur du critère d'usure peut soit être définie à la mort de l'arête, soit être définie, lorsque l'échauffement est trop important pour la résine. Des études complémentaires sont nécessaires. De plus, le choix de cette valeur joue un rôle important dans l'analyse technico-économique du processus.

En effet, ces phénomènes d'usure sont largement étudiés pour l'usinage des matériaux métalliques et de nombreux phénomènes sont mis en évidence dans la littérature [Poulachon04]. La connaissance de ces phénomènes d'usure se manifestant lors de la coupe de l'Hextool™ permettrait de maîtriser la rugosité produite en finition et de déterminer une vitesse de coupe économique pour l'opération de semi-finition. En effet, dans ces travaux des vitesses de coupe variant de 150 à 1180 m/min sont testées pour les outils en carbure de tungstène et la vitesse de coupe semble avoir un impact sur l'usure. Des essais de durée de vie nous permettraient de déterminer une vitesse de coupe économique pour l'opération de semi-finition. De plus, la connaissance de la durée de vie pour les outils en carbure de tungstène et en PCD permettrait de réaliser un choix technico-économique pour l'opération de semi-finition, en s'appuyant notamment sur le rapport débit matière / prix des outils.

D'autre part, il est à noter que de nombreux constructeurs d'outils proposent des revêtements diamant pour les outils carbure. Cette technologie permet d'accroître leur durée de vie et de produire une meilleure rugosité grâce à la conservation de l'acuité d'arête. Toutefois cette technologie n'a pas été testée dans l'Hextool™ et constitue également une perspective à ces travaux.

### **3.4. Bilan sur le choix des outils**

Les essais de puissance réalisés dans cette partie montrent que les efforts générés et la puissance consommée par la coupe de l'Hextool™ sont faibles comparées aux valeurs rencontrées pour les alliages d'aluminium. Il est donc envisageable de réaliser directement l'opération de semi-finition sans ébauche préalable pour retirer l'épaisseur de matière restant sur le moule après sa mise en forme. Pour effectuer cette opération, les outils en carbure de tungstène sont les mieux appropriés. En effet, ils tolèrent une prise de passe axiale suffisante, ce qui n'est pas le cas pour les outils en PCD à plaquettes rapportées. Les outils PCD monoblocs peuvent en revanche être employés mais la qualité d'état de surface qu'ils produisent ne justifie pas l'écart sur le coût des outils pour l'opération de semi-finition. En

effet, l'état de surface médiocre généré par les outils carbure en semi-finition ne pénalise pas la rugosité à l'issue de la finition.

Enfin, les rugosités arithmétiques accessibles avec les outils en carbure de tungstène en finition sont limitées à 3  $\mu\text{m}$ . De plus, les phénomènes d'usure pour ces outils n'autorisent pas la production d'une qualité d'état de surface constante dans le temps. Ces outils ne sont donc pas adaptés aux opérations de finition car il est essentiel d'atteindre la rugosité minimale à l'issue de la finition par usinage pour limiter au maximum les opérations de polissage manuelle [Lee06].

## 4. Choix des stratégies d'usinage

Dans cette partie, les différentes stratégies d'usinage classiquement employées pour l'usinage de moule sont passées en revue. L'impact du matériau usiné sur le choix de la stratégie d'usinage adaptée est étudié. L'influence de la stratégie d'usinage sur le choix de la géométrie d'outil (hémisphérique ou torique) et sur l'architecture du centre d'usinage (3 ou 5 axes) est également discutée.

### 4.1. Stratégies de semi-finition

La stratégie d'usinage, à 2 axes et demi par niveaux de Z est classiquement utilisée pour l'ébauche de moule métallique [Bouaziz04], [Lauwers06]. Cette stratégie permet d'utiliser des fraises cylindriques de grand diamètre et de réaliser ainsi des enlèvements de matière conséquents. Cette stratégie peut être mise en œuvre sur un centre d'usinage 3 axes. Cette opération d'usinage génère un effet d'escalier sur la surface usinée (Figure 4-16), [Lauwers06], dont la hauteur est égale à la valeur de prise de passe axiale  $a_p$ .

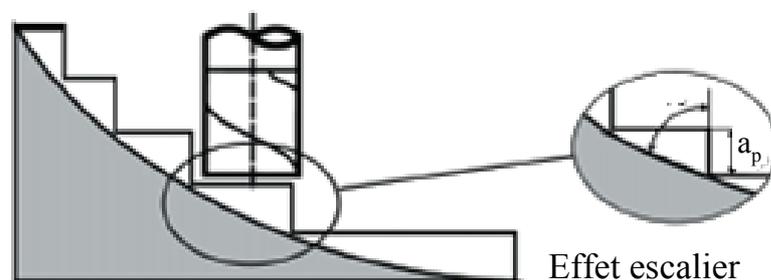


Figure 4-16: effet escalier lors d'un usinage par niveau de Z

Cet effet escalier génère des variations de prise de passe axiale lors de l'opération de semi-finition qui engendre des variations d'effort de coupe et par suite de flexion d'outil néfastes à la rugosité et à la qualité dimensionnelle du moule. C'est pourquoi en pratique, une

opération de semi-finition est pratiquée avant la finition lors de l'usinage de moule métallique [Lee06].

Toutefois, dans le cas d'un moule en Hextool™, une préforme du brut est réalisée préalablement et les enlèvements de matière sont limités à une épaisseur de 10 mm. De plus, les essais de puissance réalisés précédemment ont montré qu'une seule opération est nécessaire avant la finition. Si nous souhaitons utiliser une stratégie en niveaux de Z pour la semi-finition, alors la prise de passe axiale doit être limitée afin de générer une hauteur de marche compatible avec les valeurs de prise de passe axiale des outils de finition (cf. Chapitre 2 et 3). De faibles valeurs de prise de passe axiale pour la stratégie en niveaux de Z impliquent une multiplication du nombre de niveaux et donc une perte de productivité. Une stratégie par niveaux de Z pour l'opération de semi-finition des moules en Hextool™ ne semblent donc pas adaptée.

#### **4.2. Stratégie d'usinage sur le flanc de l'outil**

Les stratégies d'usinage sur le flanc de l'outil sont classiquement employées lors de l'usinage d'aubes de turbine et de rouet [Larue04], [Chaves-Jacob09], [Pechard09]. Cependant compte tenu de la morphologie de certains moules employés pour le procédé RTM qui présentent des parois quasi verticales, les stratégies d'usinage sur le flanc de l'outil semblent intéressantes. En effet, ces stratégies permettent d'obtenir des rugosités faibles de façon productive en s'affranchissant des motifs géométriques laissés par l'outil sur la pièce lors de l'usinage en bout [Larue04]. Des essais permettent de valider la faisabilité d'une telle stratégie pour l'usinage d'un moule en Hextool™.

Les moules en Hextool™ sont constitués d'un empilage de plis de préimprégnés (cf. Chapitre 1) d'une épaisseur moyenne de 1,3 mm, les fibres de carbone étant orientées de façon isotrope dans le plan du pli. Suivant la géométrie du moule à réaliser, l'opération d'usinage sur le flanc peut induire différentes orientations de l'axe outil par rapport au plan de dépose des plis. D'après l'état de l'art réalisé au Chapitre 2, les mécanismes de coupe sont largement dépendants de l'orientation des fibres. Les phénomènes d'arrachement et de délaminage engendrés par la coupe sont alors liés par l'orientation de l'outil par rapport au plan de dépose. Afin d'étudier cette influence, différents essais d'usinage sont menés pour les deux orientations suivantes : l'axe outil est dans le plan de dépose, l'axe outil est sensiblement orthogonal au plan de dépose.

#### 4.2.1. Axe outil dans le plan de dépose

Pour étudier la faisabilité d'une stratégie d'usinage sur le flanc avec l'axe outil dans le plan de dépose, la pièce test suivante est usinée en faisant varier différents paramètres. Au total, huit zones sont usinées avec des jeux de paramètres différents (Figure 4-17).

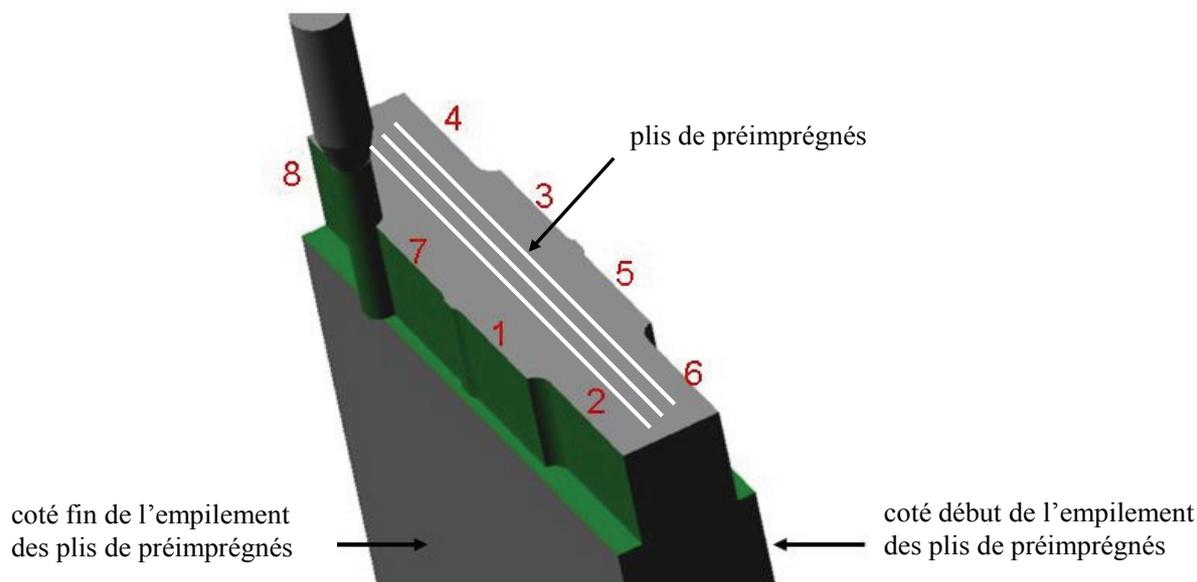


Figure 4-17: pièce test avec l'axe outil dans le plan de dépose

Une fraise monobloc en carbure de tungstène de diamètre 10 mm est utilisée avec une vitesse de coupe de 150 m/min, une avance à la dent  $f_z$  de 0,1 mm/tr/dent et une prise de passe axiale  $a_p$  de 30 mm. La prise de passe radiale  $a_e$  varie et les essais sont menés en usinant en opposition et en concordance. Enfin, ces essais sont menés sur un côté où débute l'empilement des plis et également sur le côté où se termine l'empilement, pour étudier l'impact du parallélisme des plis qui n'est pas identique sur les deux côtés (Figure 4-8). L'ensemble des paramètres d'usinage est résumé dans le Tableau 4-2.

zone	mode de travail	côté de l'empilement	ae (mm)
1	en concordance	fin	1
2	en concordance	fin	4
3	en concordance	début	1
4	en concordance	début	4
5	en opposition	début	1
6	en opposition	début	4
7	en opposition	fin	1
8	en opposition	fin	4

Tableau 4-2: paramètres d'usinage sur le flanc de l'outil

Un délaminage important est constaté lors de l'usinage en opposition (Figure 4-18), alors qu'aucun délaminage n'apparaît lors de l'usinage en concordance. De plus, le délaminage est nettement plus prononcé du côté du début de l'empilement des plis de préimprégnés. Ce phénomène peut s'expliquer par une meilleure cohésion de l'Hextool™ lorsque les plis ne sont plus parfaitement parallèles ce qui est le cas du côté de la fin de l'empilement (Figure 4-8).

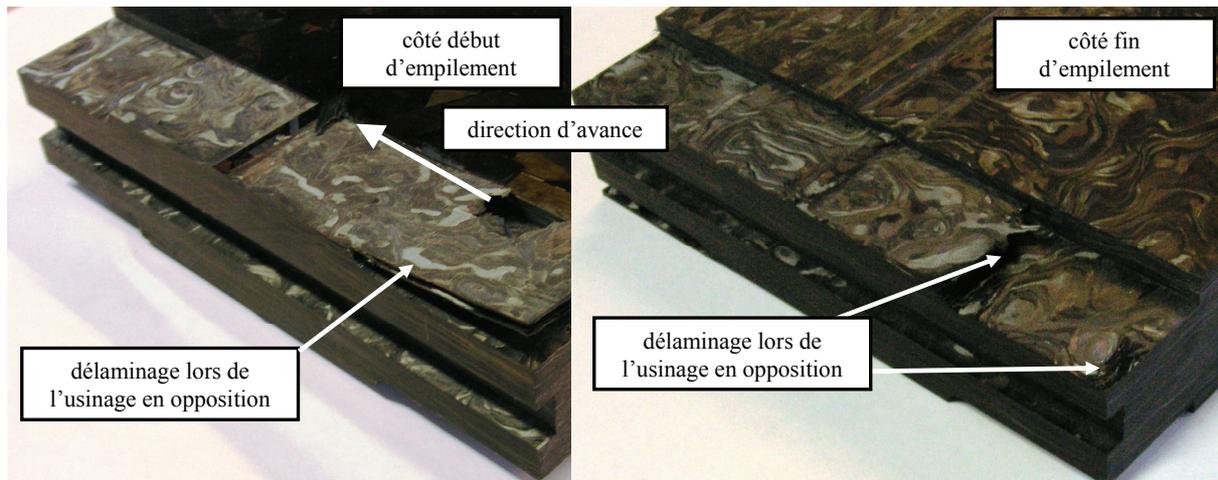


Figure 4-18: phénomené de délaminage lors de l'usinage sur le flanc de l'outil

D'autre part, la prise de passe radiale et le parallélisme des plis n'ont pas d'impacts sur la rugosité produite lors de l'usinage en concordance. Une rugosité arithmétique moyenne de  $3,5 \mu\text{m}$  est constatée sur les zones 5 à 8.

#### 4.2.2. Axe outil orthogonal au plan de dépose

Au cours de ces travaux, différents usinages sur le flanc de l'outil avec l'axe orthogonal au plan de dépose sont conduits avec des outils en carbure de tungstène et en PCD. Sur la Figure 4-19 (a), les murs verticaux sont usinés avec une fraise en carbure monobloc et avec une fraise monobloc en PCD sur la Figure 4-19 (b et c).

Au cours des différents usinages aucun phénomène de délaminage n'est apparu. Les rugosités arithmétiques moyennes obtenues valent environ  $3 \mu\text{m}$  pour les outils en carbure de tungstène et  $2 \mu\text{m}$  pour les outils en PCD. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus dans le cas de l'usinage en bout. Nous constatons également que les valeurs de rugosités accessibles en usinage sur le flanc sont plus faibles lorsque l'axe de l'outil est orthogonal au plan de dépose des préimprégnés ( $3 \mu\text{m}$  au lieu des  $3,5 \mu\text{m}$ ).

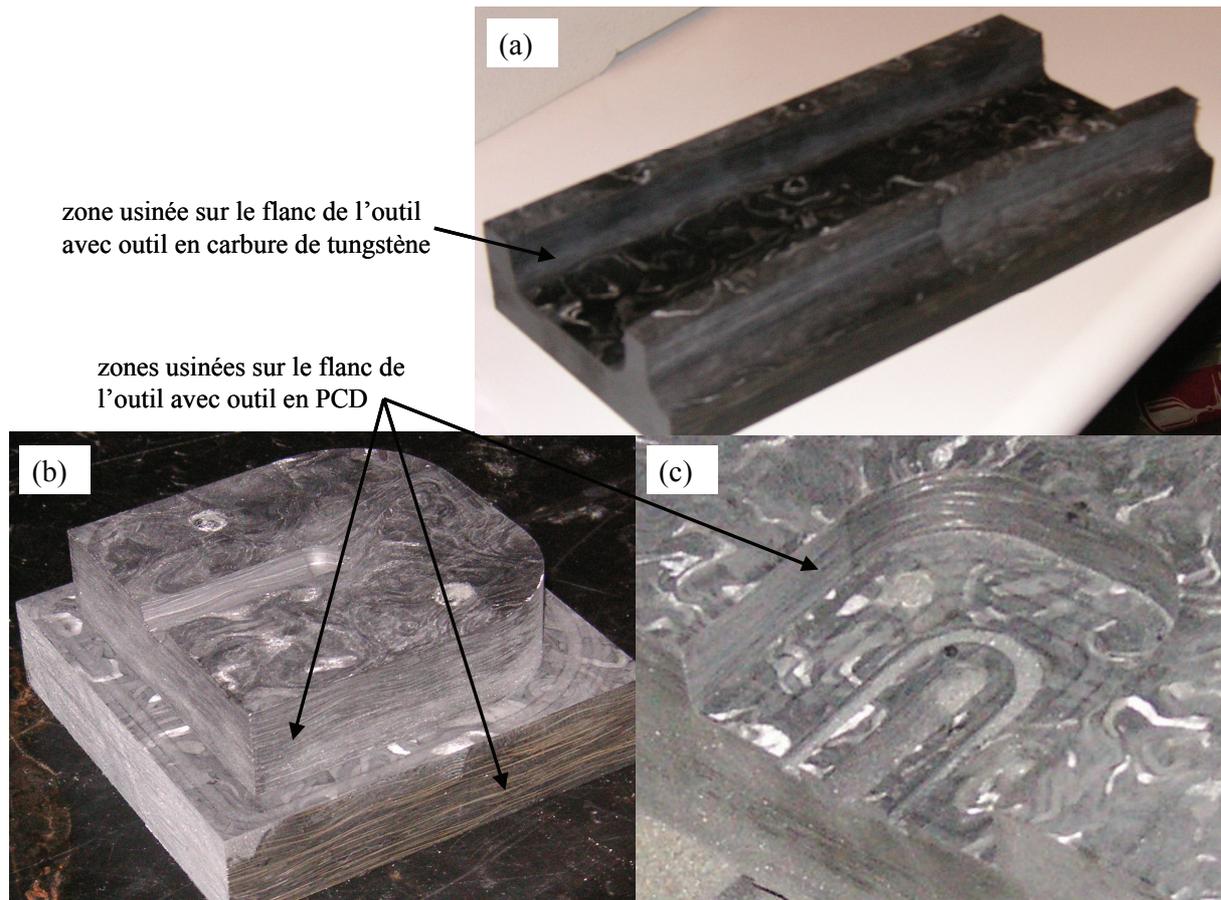


Figure 4-19: pièces obtenues en usinage sur le flanc avec l'axe de l'outil orthogonal au plan de dépose

Les stratégies d'usinage sur le flanc de l'outil sont donc aptes pour la semi-finition et la finition des murs verticaux des moules en Hextool™. Toutefois, lorsque l'axe de l'outil est dans le plan de dépose des plis de préimprégnés, l'usinage en opposition est à proscrire pour éviter le délaminage.

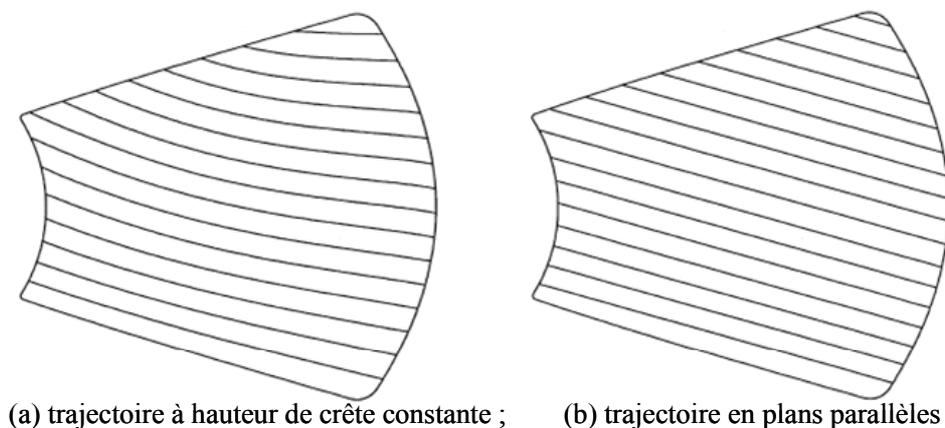


Figure 4-20: différentes trajectoires d'usinage par balayage [Feng02]

Pour les zones du moule qui ne sont pas verticales, et compte-tenu de la revue des différentes stratégies d'usinage, les opérations de balayage sont les plus adaptées pour la

semi-finition et la finition, que ce soit à 3 axes ou à 5 axes. Dans le cas de l'usinage par balayage de formes gauches, un balayage en plans parallèles avec un outil hémisphérique ou torique ne permet pas de générer une hauteur de crête constante sur la surface usinée, ce qui peut être corrigé avec des stratégies présentant une hauteur de crête uniforme [Lin96], [Feng02], [Tournier05], [Chen06]. Ces travaux s'intéressent notamment au choix d'une direction de balayage privilégiée et aux calculs de trajectoires (Figure 4-20).

## **5. Choix de la machine outil adaptée**

Au cours de ces travaux, nous avons observé que des outils coupants ou abrasifs peuvent être employés pour l'usinage de moule en Hextool™ suivant des stratégies d'usinage sur le flanc et (ou) de balayage par le bout de l'outil. Ces choix technologiques ont un impact sur les critères de choix d'une machine adaptée à l'usinage de moule, notamment au niveau de son architecture.

### **5.1. Architecture de la machine**

Les machines sérielles à architecture 3 axes et 5 axes sont les plus rencontrées dans les ateliers à l'heure actuelle. Les aptitudes de ces deux architectures pour l'usinage de moules en matériaux composites sont discutées.

#### **5.1.1. Architecture 3 axes**

Le choix d'une architecture 3 axes pour l'usinage d'un moule en Hextool™ limite les choix d'outils et de stratégies d'usinage pouvant être mises en œuvre. En effet, avec une telle architecture, l'usinage sur le flanc des murs verticaux est impossible compte tenu de la dépouille nécessaire au démoulage de la pièce pour les procédés RTM.

De plus, les opérations de balayage mises en œuvre pour l'usinage du moule doivent obligatoirement être réalisées avec un outil hémisphérique à l'exception des zones horizontales. Cette contrainte compromet l'emploi des outils abrasifs. En effet la littérature et les travaux menés au Chapitre 3 montrent que la vitesse d'usure des outils abrasifs est inversement proportionnelle au diamètre. L'emploi d'une géométrie d'outil hémisphérique provoque ainsi une usure rapide des outils et engendre par la suite des défauts de forme sur la surface usinée. Il est donc préférable d'employer des meules dont la géométrie est proche d'une fraise torique avec un diamètre le plus grand possible. Ceci n'est possible que sur une

architecture 5 axes car un angle de dépinçage doit être utilisé pour usiner une forme gauche avec ce type d'outil.

De même pour les opérations de semi-finition et de finition avec les outils en carbure de tungstène et en PCD, les zones inclinées doivent être usinées avec une géométrie d'outil hémisphérique si la machine outil a une architecture 3 axes. De plus, le fait de travailler sur une architecture 3 axes ne permet pas de contrôler l'angle de dépinçage en cours d'usinage. Ainsi, la position du point générateur varie suivant l'angle entre l'axe de l'outil est la normale à la surface usinée (Figure 4-21). Ceci entraîne une variation de la vitesse de coupe, des efforts engendrés par la coupe et de la rugosité générée [Baptista00], [Fayard09].

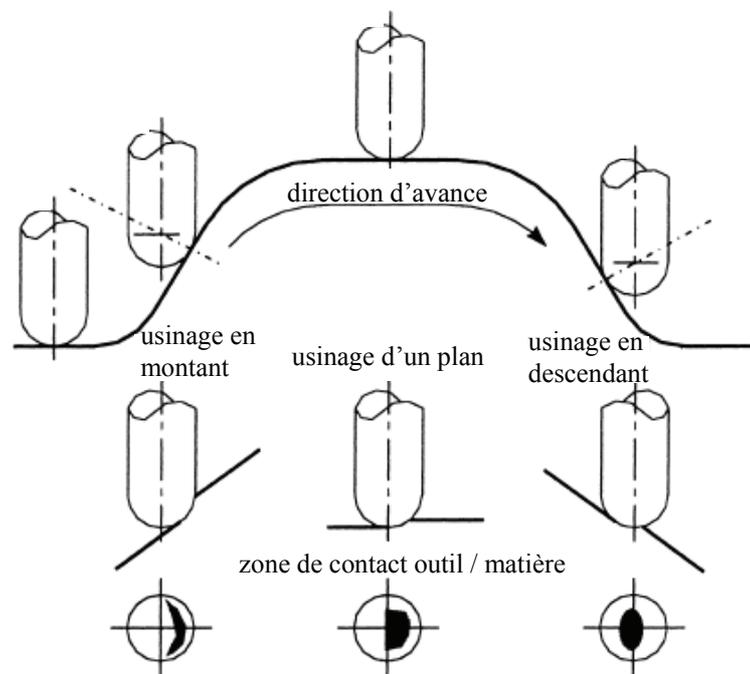


Figure 4-21: zone de contact outil / matière dans le cas du balayage 3 axes avec une fraise hémisphérique [Baptista00]

L'usinage d'un moule en Hextool™ sur une machine présentant une architecture 3 axes pénalise, ainsi, la rugosité accessible et la productivité. Dans la partie suivante, nous constatons qu'une architecture 5 axes permet d'augmenter la productivité grâce à l'emploi de fraise droite pour les zones non horizontales.

### 5.1.2. Architecture 5 axes

Tout d'abord ce type d'architecture permet d'utiliser une stratégie d'usinage sur le flanc, pour les parties quasi verticales des moules malgré l'angle de dépouille. Cette stratégie d'usinage permet d'obtenir des gains de productivité conséquents en finition par rapport à une

stratégie par balayage. Toutefois, pour pouvoir utiliser cette stratégie, il est préférable que les murs verticaux des moules soient des surfaces réglées développables afin d'éviter les interférences produisant des défauts sur la surface usinée. Nous pouvons remarquer que si cette condition n'est pas totalement vérifiée, il est possible d'adapter la trajectoire et (ou) la géométrie de l'outil pour limiter les défauts sur la pièce usinée [Chaves-Jacob09], [Pechard09].

D'autre part, lors de l'opération de finition par balayage avec une fraise hémisphérique, une architecture 5 axes permet de réaliser l'usinage en pilotant l'angle de dépinçage, pour contrôler la position du point générateur et la vitesse de coupe (Figure 4-22) [Baptista00].

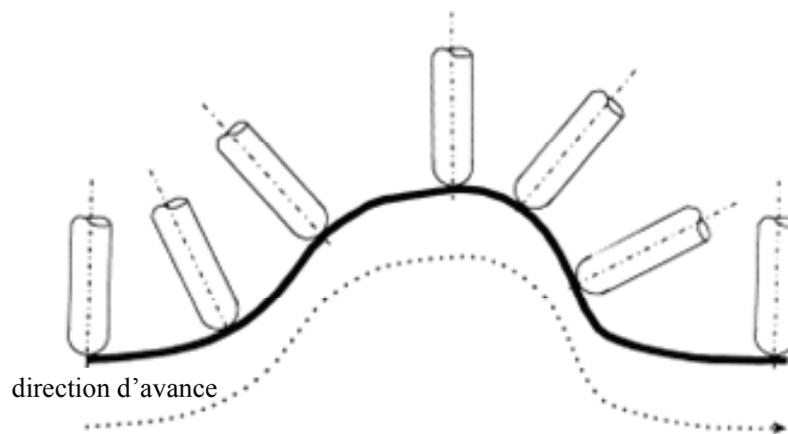


Figure 4-22 : usinage 5 axes avec un outil hémisphérique [Baptista00]

Enfin, l'usinage par balayage avec une fraise torique permet d'augmenter la productivité [Baptista00], [Toh05]. En effet, l'étude géométrique menée au Chapitre 2 montre que pour des valeurs de prise de passe radiale supérieures ou égales à la valeur seuil de rugosité, la rugosité arithmétique théorique est très proche de la rugosité mesurée (9).

$$R_a = \frac{a_e^2}{18\sqrt{3}R_{eff}} \quad (9)$$

Dans le cas d'une fraise hémisphérique, le rayon effectif de coupe  $R_{eff}$  utilisé pour le calcul de la rugosité théorique (9) est directement le rayon de la fraise. Il est à noter que cette valeur de rayon est différente de celle utilisée pour le calcul de la vitesse de coupe effective. D'autre part, pour une fraise torique,  $R_{eff}$  s'exprime suivant le rayon de l'outil  $R$ , le rayon de coin  $r$  et les angles de dépinçage longitudinaux et latéraux (respectivement  $\theta_t$  et  $\theta_n$ ), (10).

$$R_{eff} = \frac{r(R + r \sin(\theta_t))}{r \sin(\theta_t) \cos(\theta_n^2) + (R + r \sin(\theta_t)) \sin(\theta_n^2)} \quad (10)$$

Dans ces conditions, si on souhaite usiner une surface présentant une rugosité arithmétique de 2 µm (valeur usuelle de seuil de rugosité pour les outils en PCD) avec un outil hémisphérique (indice 1) et une fraise torique (indice 2) alors nous pouvons écrire l'égalité suivante (11) :

$$\frac{a_{e1}^2}{18\sqrt{3}R_{eff1}} = \frac{a_{e2}^2}{18\sqrt{3}R_{eff2}} \quad (11)$$

Nous pouvons déduire de cette relation que le rapport  $a_{e2}/a_{e1}$  varie en fonction de la racine carrée du rapport  $R_{eff2}/R_{eff1}$ . Pour illustrer le gain de productivité apporté par l'emploi d'outil torique, prenons l'exemple suivant :

- l'outil 1 est une fraise hémisphérique de diamètre 16 mm, donc  $R_{eff1} = 8$  mm
- l'outil 2 est une fraise torique de diamètre 16 mm et un rayon de coin de 0,3 mm,
- l'outil 2 est utilisé avec un angle de dépinçage de longitudinal de 2° et un angle de dépinçage latéral nul, d'après (10),  $R_{eff2} = 229$  mm,
- $R_{eff2}$  est environ 28 fois supérieur à  $R_{eff1}$ ,
- $a_{e1}$  doit donc être 5,3 fois inférieur à  $a_{e2}$  pour générer une rugosité arithmétique identique sur la surface usinée.

L'augmentation de la distance entre passe induit une réduction inversement proportionnelle du temps d'usinage théorique.

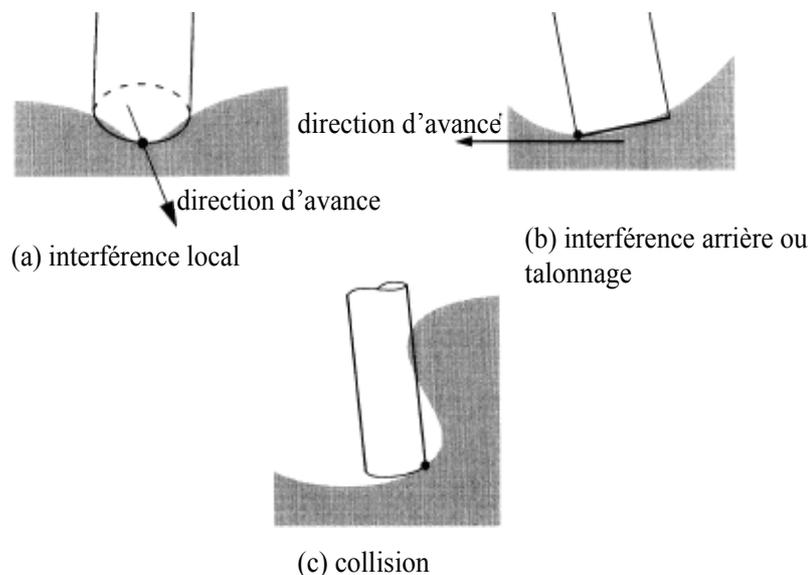


Figure 4-23: collision et interférence en usinage 5 axes [Jun03]

Toutefois, ces gains de productivité apportés par l'emploi d'outils toriques sont à minorer dans le cas de l'usinage d'une géométrie réelle de moule. En effet, certaines zones ne peuvent être usinées avec un outil torique, avec des trajectoires de balayage simples et des opérations de reprise avec un outil hémisphérique sont alors nécessaires. De plus, dans les zones du moule présentant de fortes variations de courbure, des phénomènes d'interférence et de collision peuvent apparaître entre l'outil et la surface usinée (Figure 4-23). Leur élimination passe par soit par la recherche d'une orientation particulière, soit par la réduction du diamètre de l'outil. Divers travaux de planification de trajectoires traitent de ce phénomène [Lee97], [Gray03], [Jun03].

D'autre part, l'architecture 5 axes permet d'employer des outils abrasifs de grand diamètre sur des formes gauches ce qui est favorable à la durée de vie de ces outils. Toutefois, à l'instar des fraises toriques, des problèmes de collision et d'interférence peuvent se poser en usinage 5 axes avec les outils abrasifs. De plus, certaines zones peuvent nécessiter des reprises avec un outil abrasif de plus faible diamètre ou hémisphérique.

### **5.1.3. Bilan sur l'architecture machine**

Cette étude permet de conclure que une architecture 3 axes n'est pas optimale pour l'usinage des moules. Elle n'est pas adaptée aux outils abrasifs qui doivent alors présenter une géométrie hémisphérique.

Ainsi, une architecture 5 axes permet l'emploi de stratégies d'usinage sur le flanc de l'outil. De plus, elle permet de contrôler l'angle de dépinçage des fraises hémisphériques ce qui améliore les conditions d'usinage et donc l'état de surface obtenu. Enfin, cette architecture permet l'emploi de géométrie torique pour les fraises et les outils abrasifs et ainsi d'augmenter la productivité. Toutefois sur une géométrie réelle de moule des reprises avec un outil hémisphérique (coupant ou abrasif) peuvent s'avérer nécessaires ce qui réduit les gains de productivité. De plus, l'emploi d'une stratégie d'usinage 5 axes nécessite une attention particulière lors de la planification des trajets d'usinage pour éviter les collisions et les interférences.

Une architecture de machine 5 axes semblent donc mieux adaptée à l'usinage de moules en Hextool™. Cependant, suivant la technologie d'outil retenue pour pratiquer l'opération de finition, la machine outil doit disposer d'équipements spécifiques pour l'usinage des matériaux composites.

## 5.2. Equipements spécifiques

L'usinage de matériaux composites, contrairement aux matériaux métalliques ne génèrent pas de copeaux lors de l'usinage mais de la poussière, dont la taille des particules est de l'ordre du diamètre des fibres du matériau. Dans le cas de l'Hextool™, les fibres de carbone ont un diamètre de 7  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond sensiblement à la taille des particules de poussière produites par l'usinage.

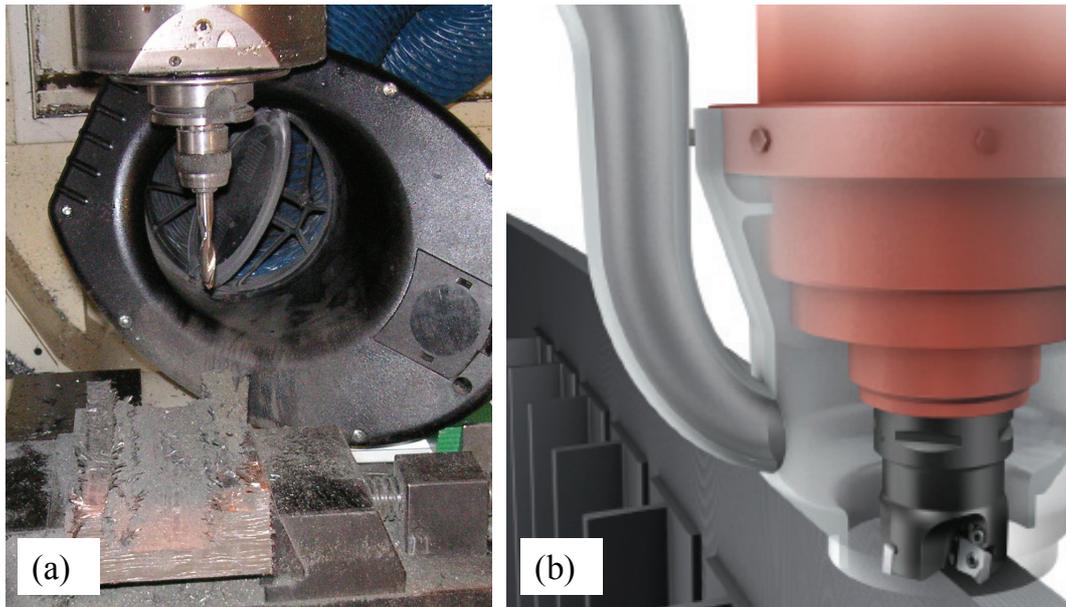


Figure 4-24: (a) aspiration fixée à la table de la machine ; (b) cloche d'aspiration fixée à la broche

Ces poussières fines peuvent être dangereuses pour le système respiratoire de l'opérateur et provoquent des démangeaisons lorsqu'elles sont en contact avec la peau. De plus, elles pénètrent dans les différents organes de la machine (glissières, armoire électrique...) et peuvent provoquer des pannes et une usure prématurée. Il existe deux moyens pour traiter les poussières générées par l'usinage de matériaux composites : l'arrosage qui permet de colmater les poussières ou l'aspiration.

L'arrosage à l'eau ou à l'huile soluble permet de colmater les poussières générées par l'usinage de matériaux composites. L'arrosage à l'eau ou à l'huile soluble est en revanche bien toléré par l'Hextool™. Il est même indispensable lorsque des outils abrasifs sont employés (cf. Chapitre 3). Il est alors nécessaire d'équiper la machine d'un dispositif de filtration de fluide de coupe afin d'éviter un endommagement rapide du système d'arrosage, notamment au niveau de la pompe.

En cas d'absence de lubrification, il est nécessaire de prévoir un système d'aspiration et de filtration, soit à partir d'un système de cloche fixé à la broche (Figure 4-24 (b)) ou à partir d'une tête d'aspiration fixée à proximité de la pièce (Figure 4-24 (a)).

## 6. Application dans le cadre du projet LCM-Smart

Le projet LCM-Smart offre l'opportunité d'appliquer cette analyse à un cas de moule pour une pièce industrielle qui est une poutre en A, de 8 mm d'épaisseur maximale. La pièce est formée de cinq zones planes (jaune) et d'un enchainement de murs ayant une dépouille de 3° (Figure 4-25). Les problèmes d'usinage se situent essentiellement au niveau des pentes (magenta). En effet, l'étude montre que l'usinage en concordance doit être privilégié, ce qui n'est pas toujours compatible avec l'exigence d'usiner en montant pour les fraises deux tailles. La conjonction de ces deux contraintes peut imposer l'utilisation d'une fraise hémisphérique.

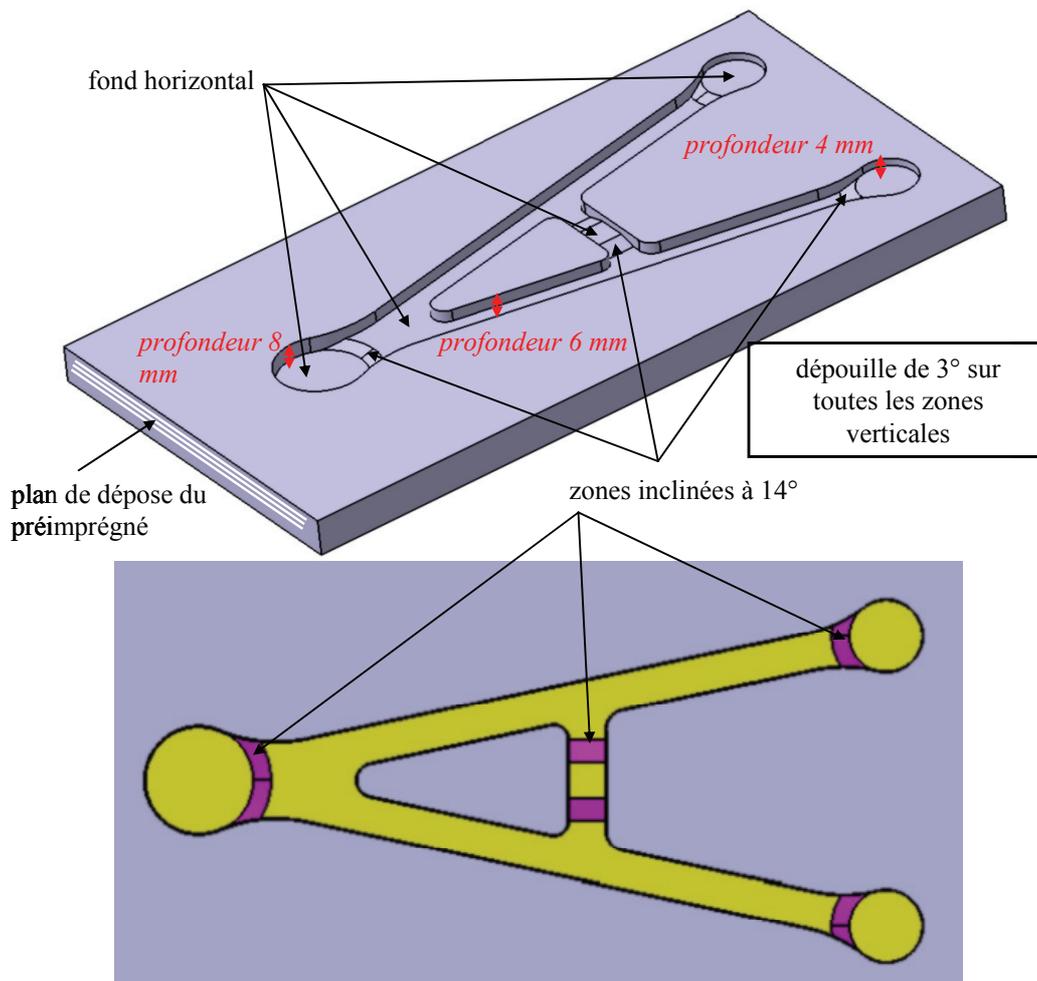


Figure 4-25: typologie du moule pour la poutre en A

### 6.1. Gamme 1 avec polissage manuel

Dans le cadre de cette gamme, un outil PCD est choisi pour réduire le temps de polissage manuel, le Ra visé est donc de 2  $\mu\text{m}$ . L'épaisseur de matière étant compatible avec la hauteur de l'arête de coupe (outil PCD monobloc), une seule opération par entité est nécessaire.

Outil	$V_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/tr/z)	$a_p$ (mm)	$V_f$ (mm/min)	N (tr/min)
Fraise PCD D10	500	0,1	8	3200	16000
Fraise PCD D3.8	190	0,1	4	3200	16000

Tableau 4-3: conditions de coupe pour la gamme 1

Les conditions de coupe énoncées dans le Tableau 4-3 sont employées et les trajectoires sont réalisées sur le centre d'usinage 5 axes Huron KX15. Le temps d'usinage total s'élève à 11 minutes. La figure suivante représente les zones usinées avec les deux outils.

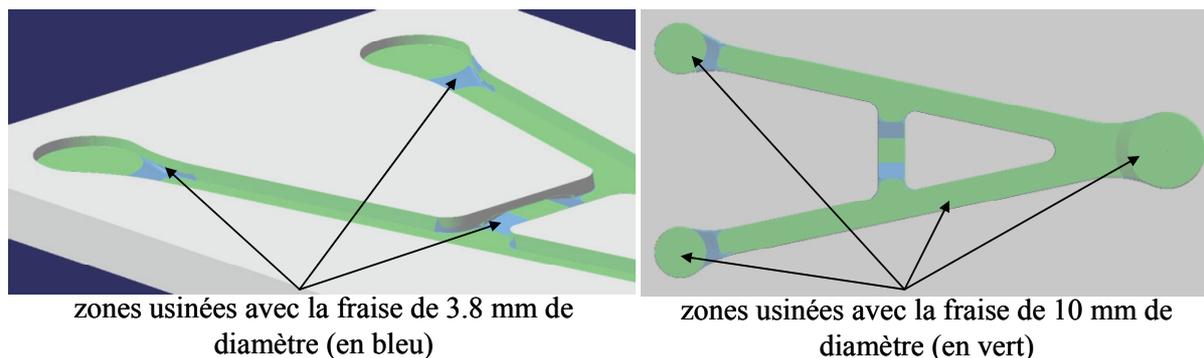


Figure 4-26: simulation des différentes zones usinées

La Figure 4-26 suivante présente les zones usinées par la fraise de diamètre 10 mm (en vert) et par la fraise de diamètre 3.8 mm en bleu. Des reprises manuelles sont nécessaires dans les zones concaves.

La Figure 4-27 représente l'aspect général des trajets de la fraise de diamètre 10 mm et le zoom d'une zone particulière usinée par la fraise de diamètre 3.8 mm. Lors de l'usinage de la pente en magenta, il n'est pas possible d'orienter l'outil tangent au mur latéral et dépinçé par rapport à la normale la surface. L'usinage du bord en orientant l'outil normal ou dépinçé par rapport à la normal engendre des interférences avec le mur. Une zone non usinée à reprendre apparaît donc au niveau du raccordement entre les surfaces.

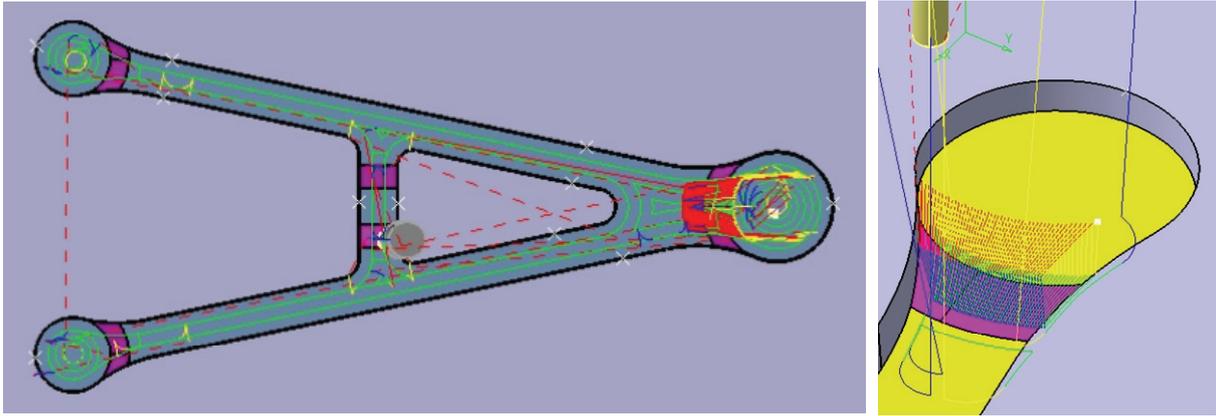


Figure 4-27: trajets d'usinage

En conclusion, l'opération d'usinage ne pose pas de problème. La faible valeur des efforts de coupe permet d'éliminer les opérations d'ébauche. Par contre, le niveau de qualité attendu de l'état de surface impose des reprises manuelles.

## 6.2. Gamme 2 avec meulage

Cette gamme nécessite une opération d'ébauche/finition et une opération de meulage. Un outil carbure est préféré à l'outil PCD pour l'ébauche du fait de son coût. Les diamètres des outils sont identiques

Pour l'opération de meulage, une meule diamantée de diamètre 14 mm est choisie pour minimiser son usure, ce qui engendre des zones non meulées dans les parties concaves de la pièce. Les conditions de coupe sont données dans le Tableau 4-4.

Outil	$V_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/tr/z)	$a_p$ (mm)	$V_f$ (mm/min)	N (tr/min)
Fraise D10	500	0,1	8	3200	16000
Fraise D3.8	190	0,1	4	3200	16000
Meule D14	700	N/A	0,5	1200	16000

Tableau 4-4: conditions de coupe pour la gamme 2

Les temps d'usinage des deux premières opérations sont similaires à la gamme 1. Le temps d'usinage du meulage s'élève à 16 minutes. La Figure 4-28 indique la zone reprise par la meule qui correspond à la quasi-totalité de la pièce et en particulier, les surfaces planes et les surfaces « quasi » verticales. Les pentes ne sont pas reprises avec la meule, car son diamètre important engendre des zones non polies à reprendre.

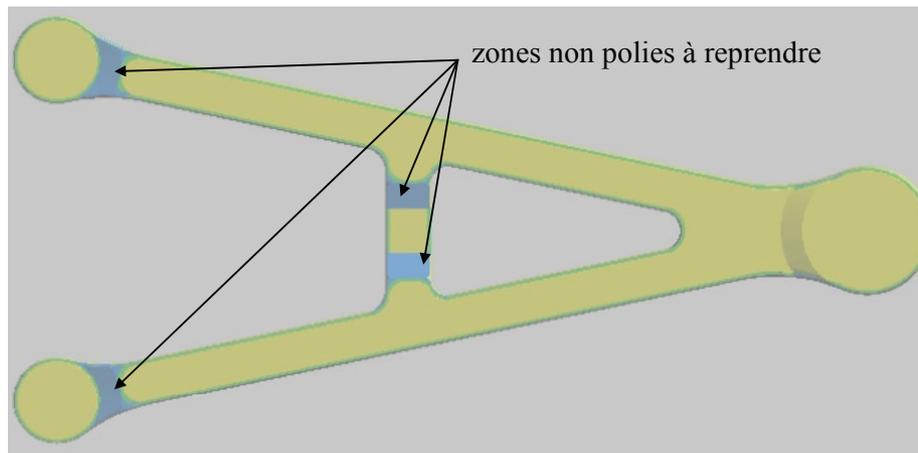


Figure 4-28: zones à polir manuellement

## 7. Conclusion

D'après la morphologie de la préforme des moules en Hextool™ et les mesures de puissance consommée réalisée, il apparaît que l'opération d'ébauche peut être supprimée. En effet, les valeurs de puissance consommée et les pressions spécifiques de coupe obtenues sont trois à quatre fois plus faibles que celles obtenues pour un alliage d'aluminium. Dans ces conditions, seule une opération de semi-finition et de finition composent la gamme d'usinage d'un moule en Hextool™.

Nos travaux menés montrent que les stratégies d'usinage sur le flanc et de balayage sont les mieux adaptées aux opérations de semi-finition et de finition. En effet, comme en témoigne les géométries de moules proposés, certaines pièces présentent des parois quasi verticales. Pour ces zones, l'usinage sur le flanc apporte un gain de productivité. Toutefois, lorsque l'axe outil est parallèle au le plan de dépose des plis de préimprégnés, des phénomènes de délaminage peuvent apparaître. Pour les zones ne pouvant pas être usinées sur le flanc, une stratégie par balayage est retenue. En finition, le pas de balayage est déterminé en s'appuyant sur les travaux menés au Chapitre 2.

Concernant les outils, le prix et la valeur des prises de passe axiale admissibles permettent de conclure que le carbure de tungstène est le choix de référence pour les opérations de semi-finition. En revanche, ces outils ne permettent pas d'atteindre une rugosité suffisante pour les opérations de finition, pour laquelle des outils PCD ou des outils abrasifs peuvent être utilisés. Ce choix dépend des moyens disponibles dans l'atelier. En effet, un dispositif d'arrosage et de filtration des fluides de coupe est nécessaire pour utiliser des outils abrasifs. De plus, compte tenu des mécanismes d'usure des outils abrasifs, il est préférable

d'employer des outils de grand diamètre. Il est donc indispensable de disposer d'un centre d'usinage 5 axes avec arrosage permettant d'utiliser des outils abrasifs en contrôlant leur angle de dépinçage. Ces deux technologies ne produisent pas la même rugosité. Un temps de polissage manuel conséquent est à prévoir lorsqu'une finition par outil PCD est pratiquée pour atteindre la rugosité arithmétique cible de  $0,8 \mu\text{m}$ . Si un outil abrasif est employé, le polissage manuel se résume à quelques reprises localisées, le temps de polissage manuel est alors significativement réduit.

Si l'atelier ne dispose pas d'un centre d'usinage 5 axes, les opérations d'usinage sur le flanc des parois verticales de moules sont impossibles compte-tenu des dépouilles nécessaires sur le moule et seule une opération de balayage peut être pratiquée. De plus les outils hémisphériques sont systématiquement utilisés, ce qui pénalise la productivité. Pour conclure, nous remarquons qu'un centre d'usinage 5 axes avec un dispositif d'arrosage et de filtration des fluides de coupe est le choix de référence pour l'usinage de moules en Hextool™. En effet, il permet d'usiner un moule de façon plus productive et présentant une rugosité plus faible.



## Conclusion

Ces travaux de thèse contribuent à l'amélioration de la mise en œuvre des procédés de fabrication de pièces aéronautiques en matériau composite. L'étude s'est focalisée sur l'usinage de moules en matériaux composites utilisés pour les procédés LCM. En particulier, nous nous sommes intéressés aux problèmes d'état de surface et de gamme d'usinage. En effet, la problématique industrielle est de proposer un processus de fabrication de moules en matériaux composites, permettant d'obtenir un outillage présentant une rugosité arithmétique de  $0,8 \mu\text{m}$  tout en restant productif et économiquement viable. Les travaux de recherche menés pour répondre à cette problématique industrielle permettent d'identifier trois verrous scientifiques. Le premier s'intéresse à la finition par outil coupant et plus particulièrement à l'identification de la valeur limite de rugosité accessible et les phénomènes l'influençant. Le deuxième concerne la faisabilité d'une opération de finition par outil abrasif sur un centre d'usinage. Enfin, le troisième verrou consiste à proposer une gamme productive d'usinage de moule en matériaux composites. Cette étude technico-économique intègre le choix de la machine outil, des opérations d'usinage et des outils.

Les travaux menés sur la finition par outil coupant mettent en évidence l'apparition d'une valeur minimale de rugosité accessible, de l'ordre de  $2 \mu\text{m}$ . Ce phénomène de seuil a été mis en évidence lors d'une opération de balayage par plans parallèles avec un outil hémisphérique et torique en PCD. La valeur de seuil de la rugosité et la prise de passe radiale associée dépendent des conditions d'usinage, du couple outil / matière et de l'orientation de l'outil par rapport à la pièce. Ce phénomène, lié aux arrachements générés lors de la coupe, pourrait sans doute être généralisé à l'ensemble des matériaux composites. Ainsi, cette étude permet de donner une valeur de prise de passe radiale optimale pour ce couple outil / matière. En effet, le meilleur ratio rugosité / temps d'usinage est atteint lorsque la valeur du seuil de rugosité est atteinte.

Cependant, les valeurs de rugosité arithmétique obtenues avec les fraises en PCD sont supérieures aux attentes industrielles de qualité de surface pour les moules en Hextool™ ( $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ ). La finition par outil coupant ne permet donc pas d'atteindre l'exigence d'état de surface nécessaire à l'utilisation du moule pour les procédés RTM et une opération de

polissage manuelle demeure indispensable. Ce constat nous a conduits à nous intéresser à l'automatisation de l'opération de polissage. L'état de l'art réalisé a permis de retenir une solution de meulage sur un centre d'usinage, grâce à la simplicité de mise en œuvre et grâce à une productivité accrue comparée aux solutions de polissage sur robot anthropomorphe ou sur centre d'usinage. Afin de valider l'efficacité et la faisabilité d'une finition par meulage de moules en matériaux composites, un outil prototype est spécialement conçu en partenariat avec la société Asahi Diamond Industrial Europe. Cette technologie permet alors d'atteindre une rugosité arithmétique moyenne de  $0,5 \mu\text{m}$  pour une granulométrie de  $25 \mu\text{m}$ . L'outil meule tolère des variations de prise de passe axiale de  $0,07$  à  $0,87 \text{ mm}$  tout en générant une qualité de surface constante, ce qui permet de pratiquer l'opération de finition sans prendre de précautions particulières lors de l'opération de semi-finition. D'autre part, la productivité de ce procédé de meulage est validée, car des vitesses d'avance jusqu'à  $1200 \text{ mm/min}$  sont testées sans impact sur la qualité de surface produite. Enfin, l'usure n'affecte pas la qualité de surface produite, cependant elle peut engendrer des défauts de forme sur le moule usiné.

D'après la morphologie de la préforme des moules en Hextool™ et les mesures de puissance consommée réalisées, il apparaît que l'opération d'ébauche peut être supprimée. En effet, les valeurs de puissance consommée et les pressions spécifiques de coupe obtenues sont trois à quatre fois plus faibles que celles obtenues pour un alliage d'aluminium. Dans ces conditions, seule une opération de semi-finition et de finition composent la gamme d'usinage d'un moule en Hextool™. Les travaux menés ici montrent que les stratégies d'usinage sur le flanc et de balayage sont les mieux adaptées aux opérations de semi-finition et de finition. Toutefois, lorsque l'axe outil est dans le plan de dépose des plis de préimprégnés, des phénomènes de délaminage peuvent apparaître. Pour les zones ne pouvant pas être usinées sur le flanc, une stratégie par balayage doit alors être retenue.

Concernant les outils, le prix et les prises de passe axiale admissibles font des outils en carbure de tungstène le choix de référence pour les opérations de semi-finition. Toutefois, la connaissance de la loi d'usure de ces outils pour l'usinage de l'Hextool™ permettrait de déterminer une vitesse de coupe économique. Cependant, ces outils ne permettent pas d'atteindre une rugosité suffisante pour les opérations de finition. Pour la finition, des outils PCD ou des outils abrasifs peuvent être utilisés. Compte tenu des mécanismes d'usure des outils abrasifs, il est préférable d'employer des outils de grand diamètre. Il est donc indispensable de disposer d'un centre d'usinage 5 axes avec arrosage permettant d'utiliser des outils abrasifs en contrôlant leur angle de dépinçage. Ces deux technologies n'aboutissent pas

à la même rugosité générée. Un temps de polissage manuel conséquent est à prévoir lorsqu'une finition par outil PCD est pratiquée pour atteindre la rugosité arithmétique cible de  $0,8 \mu\text{m}$ . Si un outil abrasif est employé, le polissage manuel se résume à quelques reprises localisées, le temps de polissage manuel est alors significativement réduit.

L'usinage sur un centre d'usinage 3 axes dégrade fortement la productivité du processus pour un niveau de qualité donné. Ainsi, un centre d'usinage 5 axes avec un dispositif d'arrosage et de filtration des fluides de coupe est le choix de référence pour l'usinage de moules en Hextool™.

Ces travaux de thèse se sont intéressés à l'usinage de forme des matériaux composites destinés à la fabrication de pièces d'avion, ce qui n'a jamais été abordé dans la littérature avant. Les problématiques d'état de surface et de choix de stratégie d'usinage pour un critère d'état de surface donné ont été au cœur de la thèse. De plus, ils permettent d'apporter une réponse économiquement viable à la problématique industrielle de production de moules en matériaux composites. Ce travail ouvre ainsi différentes perspectives de recherche.

D'un point de vue fondamental, ces travaux montrent que la compréhension des phénomènes de coupe n'est pas complète lorsque l'on utilise des outils hémisphériques ou toriques dans des matériaux inhomogènes. En effet, la géométrie de l'arête de coupe et l'hétérogénéité du matériau engendrent une grande variabilité des phénomènes physiques. Les approches macroscopiques calculant soit les valeurs maximales, soit les valeurs moyennes ne sont plus performantes. Ces travaux de thèse et la littérature soulignent l'impact de l'orientation des fibres sur les mécanismes de coupe et les états de surface qui en résultent. Ainsi, pour les matériaux composites présentant diverses orientations de renforts, comme l'Hextool™, il semble préférable d'opter pour un modèle homogène et macroscopique capable de donner la plage des valeurs attendues quelque soit l'orientation des renforts. Mais, il convient d'étudier, de plus, l'influence de la variation cyclique ou non des phénomènes physiques sur la dégradation de l'arête de coupe relativement à la valeur moyenne des phénomènes, puisque le processus d'usure et de dégradation des arêtes de coupe est souvent envisagé comme un processus continu fonction du temps. A notre sens, les perturbations instantanées et les instabilités peuvent devenir des phénomènes induisant des dégradations importantes, alors qu'ils sont par essence difficilement quantifiables. Il convient donc d'approfondir la réflexion dans cette direction et de répondre à la question suivante : est-il possible de formaliser l'impact d'instabilités sur la tenue d'une arête de coupe au moyen de

modèles et d'expérimentations continues ou semi-continues ? Comment introduire des instabilités dynamiques dans la modélisation de la coupe ?

Un autre point fondamental concerne la modélisation et la description des états de surface pour les matériaux hétérogènes. Dans le cadre de cette thèse, l'hétérogénéité du matériau couplée aux exigences d'état de surface montre que l'utilisation des paradigmes usuels n'est plus suffisamment précise. Il convient donc de proposer un nouveau paradigme. Les premières observations conduites ici permettent de nous orienter vers la définition d'un critère surfacique compte tenu de l'hétérogénéité du matériau. De plus, les longueurs ou les surfaces d'évaluation devront présenter des dimensions nettement supérieures au motif macro-géométrique des renforts du matériau afin de s'affranchir de l'hétérogénéité locale générée par la présence des renforts.

Mais ces travaux ont aussi montré que l'usinage de forme des matériaux composites pose encore aussi des problèmes généralisables à la problématique de l'usinage des pièces de formes complexes. Le premier problème concerne l'établissement semi-automatique ou automatique de gamme de fabrication et leur optimisation selon des critères économiques. Cette thèse a montré les limites actuelles des logiciels de FAO qui répondent uniquement à des considérations géométriques. Les pièces étudiées dans ce mémoire, sont des pièces composites qui doivent essentiellement assurer la transmission d'efforts. Par conséquent, la complexité géométrique est essentiellement due à la complexité d'agencement de formes simples. Pour améliorer la performance du processus, il convient de proposer un outil informatique permettant de produire des gammes performantes à partir des cas génériques traités dans ce mémoire.

D'autre part, ce mémoire a montré que la principale source de performance industrielle se situe au niveau de l'emploi des outils abrasifs, capables de produire le niveau d'état de surface attendu, avec une productivité satisfaisante. Par contre, il convient de proposer une méthodologie de contrôle de la géométrie de l'arête de la meule, dont l'évolution engendre des défauts de forme. Le problème est donc de proposer un modèle formel d'estimation du profil de meule en fonction de la géométrie de la pièce, de l'engagement de l'outil et de la position du point de contact.

Une première voie d'amélioration, à court terme, concerne la tenue à l'usure de différentes technologies d'outil. Les travaux menés ici permettent de considérer le carbure de tungstène comme choix de référence pour les outils dédiés à l'opération de semi-finition. Cependant, une campagne d'essais d'usure permettrait de déterminer une vitesse de coupe

économique pour cette opération. De plus, ces essais pourraient être l'occasion d'évaluer le gain de durée de vie apporté par les revêtements, notamment les revêtements CVD. Ainsi, un choix technico-économique optimale des outils et des différents paramètres d'usinage serait proposé pour l'opération de semi-finition d'un outillage en matériaux composites. D'autre part, une campagne d'essais similaires menés avec les outils abrasifs dédiés à l'opération de finition permettrait d'affiner le choix des différents paramètres et notamment la vitesse d'avance. Ceci permettrait d'affiner l'estimation de l'usure proposée dans ces travaux et de développer des actions correctives plus performantes. Une piste prometteuse pour contrôler les défauts géométriques et dimensionnels liés à l'usure est, sans doute, l'adaptation de la trajectoire de finition par meulage. Ces trajectoires devront s'adapter en tous points aux changements de la géométrie de l'outil qui dépendant eux-mêmes des différents paramètres d'usinage de l'opération de finition. Ces paramètres sont la vitesse de coupe réelle, la vitesse d'avance réelle, les angles de dépinçage, la prise de passe radiale ainsi que la prise de passe axiale qui varie en fonction du motif laissé par l'opération de semi-finition.



## Références bibliographiques

- [Altan01] T. Altan, B. Lilly, Y.C. Yen, *Manufacturing of Dies and Molds*, CIRP annals – Manufacturing Technology, vol. 50, Issue 2, p. 404-422, 2001.
- [Arola96] D. Arola, M. Ramulu, D.H. Wang, *Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite*, Composites Part A, vol. 27A, p. 121-133, 1996.
- [Arola97] D. Arola, M. Ramulu, *Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites : a finite element analysis*, International journal of mechanical sciences, vol. 39, p. 597-613, 1997.
- [Arola02] D. Arola, M.B. Sultan, M. Ramulu, *Finite element modelling of edge trimming fiber reinforced plastics*, Journal of manufacturing science and engineering, vol. 24, p. 32-41, 2002.
- [Baptista00] R. Baptista, J.F. Antune Simoes, *Three and five axes milling of sculptured surfaces*, Journal of materials processing technology, vol. 103, p. 398-403, 2000.
- [Bathias05] C. Bathias et coll., *Matériaux composites*, Editions Dunod, ISBN 2 10 006398 7, 2005.
- [Berreur02] L. Berreur, B. de Maillard, S. Nösperger, *L'industrie française des matériaux composites. Etude prospective composites, rapport de synthèse pour le compte de la DiGITIP / SIM*, 2002.
- [Bhatnagar94] N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N.K. Naik, R. Komanduri, *On the machining of fibre reinforced plastic (FRP) composite laminate*, International journal of machine tools and manufacture, vol. 35, p.701-716, 1994.
- [Binetruy06] C. Binétruy, *Physique du moulage des composites avancés : applications*, Techniques de l'ingénieur, AM3719, 2006.
- [Bonnet10] C. Bonnet, *Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage de l'empilage Ti6Al4V / Composite fibre de carbone*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.
- [Bouaziz04] Z. Bouaziz, J.B. Younes, A. Zghal, *Methodology of machining costs evaluation for die and mould manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 152, p. 237-245, 2004.

- [Bouzakis03] K.D. Bouzakis, P. Aichouch, K. Efstathiou, *Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools*, *International Journal of machine tools and manufacture*, vol. 43, p. 499-514, 2003.
- [Chang06] Chung-Shin Chang, *Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools*, *Journal of materials processing technology*, vol. 180, p. 117-129, 2006.
- [Chardon09a] G. Chardon, H. Chanal, A. Gazel, E. Duc, *Etude prospective sur l'usinage de forme de matériaux composites*, 11ème Colloque National AIP Primeca, La Plagne, France, Avril 22-24, 2009.
- [Chardon09b] G. Chardon, H. Chanal, A. Gazel, E. Duc, *Prospective study on the surface machining of fiber reinforced composites*, 12<sup>th</sup> CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Donastia-San Sebastian, Spain, May 7-8, 2009.
- [Chardon10a] G. Chardon, H. Chanal, E. Duc, *Usinage de finition de moules en matériaux composites avec outil hémisphérique : mise en évidence d'un seuil de rugosité*, Intercut 2010 – 6<sup>ème</sup> assises MUGV, Cluny, France, Octobre 13-15, 2010.
- [Chardon10b] G. Chardon, H. Chanal, E. Duc, *Finishing process of mold in composites material with an abrasive diamond tool*, IDMMME2010, Bordeaux, France, October 20-22, 2010.
- [Chardon10c] G. Chardon, H. Chanal, E. Duc, *Surface finishing of mold in fiber reinforced composites with a ball end cutter tool : detection of a minimum reachable value of roughness*, Eighth International Conference on High Speed Machining, Metz, France, December 8-10, 2010.
- [Chaves-Jacob09] J. Chaves-Jacob, G. Poulachon, E. Duc, *New approach to 5-axis flank milling of free-form surfaces : Computation of adapted tool shape*, *Computer Aided Design*, vol. 41, p. 918-929, 2009.
- [Chen06] Z.C. Chen, D. Song, *A practical approach to generating accurate iso-cusped tool paths for three-axis CNC milling of sculptured surface parts*, *Journal of manufacturing processes*, vol. 8, p. 29-38, 2006.
- [Childs01] T.H.C. Childs, D.J. Moss, *Wear and costs issues in magnetic fluid grinding*, *Wear*, vol. 249, p. 509-516, 2001.
- [Cordebois03] J.P. Cordebois et coll., *Fabrication par usinage*, Dunod, ISBN 2100055860, 2003.
- [Davim05] J. P. Davim, P. Reis, *Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments*, *Journal of materials processing technology*, vol. 160, p. 160-167, 2005.

- [Davim09] J. P. Davim, L. R. Silva, A. Festas, A.M. Abrao, *Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing*, *Materials and design*, vol. 30, p. 228-234, 2009.
- [Debout10] P. Debout, *Calcul de trajets de dépose de composite dans le cadre de la fabrication de pièces aéronautiques*, Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, 2010.
- [Debout11] P. Debout, H. Chanal, E. Duc, *Tool path smoothing of a redundant machine : Application to automated fiber placement*, *Computer-Aided-Design*, vol. 43, p. 122-132, 2011.
- [Demirci10] I. Demirci, S. Mezghani, A. Mkaddem, M. El Mansori, *Effects of abrasive tools on surface finishing under brittle-ductile grinding regimes when manufacturing glass*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, p. 466-473, 2010.
- [Dessarthe96] A. Dessarthe, *Usinage des matières plastiques, matériaux composites et élastomères*, publications du CETIM, ISBN 2-85400-835-3, 1996.
- [Duc98] E. Duc, *Usinage de formes gauches – Contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage*, Thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 1998.
- [Duc03] E. Duc, *Fabrication assistée par ordinateur*, Ed. Lavoisier, 2003.
- [Fayard09] R. Fayard, *Caractérisation des mécanismes d'enlèvement de matière d'un matériau composite (Hextool)*, Mémoire de Master de l'Ecole doctorale de Saint Etienne – Univ. Jean Monnet, ENSMSE, ENISE, 2009.
- [Eriksen99] Else Eriksen, *Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic*, *International Journal of machine tools and manufacture*, vol. 39, p. 1611-1618, 1999.
- [Felder09] E. Felder, *Usinage par abrasion : Principes généraux*, *Techniques de l'ingénieur*, BM7052, 2009.
- [Feng02] H.Y. Feng, H. Li, *Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining*, *Computer-Aided Design*, vol. 34, p. 647-654, 2002.
- [Ferreira99] J.R. Ferreira, N.L. Coppini, G.W.A. Miranda, *Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite material*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92-93, p. 135-140, 1999.

- [Gaitonde 08] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, J.C. Rubio, A.E. Correia, A.M. Abrao, J.P. Davim, *Analysis of parametric influence on delamination in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 29, p. 1768-1776, 2008.
- [Ghidossi06] P. Ghidossi, M. El Mansori, F. Pierron, *Influence of specimen preparation by machining on the failure of polymer matrix off-axis tensile coupons*, *Composites science and technology*, vol. 66, p. 1857-1872, 2006.
- [Gray03] P. Gray, S. Bedi, F. Ismail, *Rolling ball method for 5-axis surface machining*, *Computer-Aided Design*, vol. 35, p. 347-357, 2003.
- [Grzesik96] W. Grzesik, *A revised model for predicting surface roughness in turning*, *Wear*, vol. 194, p. 143-148, 1996.
- [Hecker03] R.L. Hecker, S.Y. Liang, *Predictive modelling of surface roughness in grinding*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, p. 755-761, 2003.
- [Hock97] S. Hock, *High speed cutting (HSC) in die and mould manufacture*, *1st french and german conference on high speed machining*, p. 274-283, 1997.
- [Hu04] N.S. Hu, L.C. Zhang, *Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics*, *Journal of materials processing technology*, vol. 152, p. 333-338, 2004.
- [Huissoon02] J. Huissoon, F. Ismail, A. Jafari, S. Bedi, *Automated polishing of die steel surfaces*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, p. 534-544, 2002.
- [Jun03] C.S. Jun, K. Cha, Y.S. Lee, *Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method*, *Computer-Aided Design*, vol. 35, p. 549-566, 2003.
- [Jung05] T.S. Jung, M.Y. Yang, K.J. Lee, *A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part I : Formulation of characteristic lines of cut remainder*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, p. 833-840, 2005.
- [Kini10] M.V. Kini, A.M. Chincholkar, *Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of  $\pm 30^\circ$  glass fibre polymer pipes*, *Materials and design*, vol. 31, p. 3590-3598, 2010.
- [Lai08] X. Lai, H. Li, C. Li, Z. Lin, J. Nu, *Modelling and analysis of microscale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, p. 1-14, 2008.

- [Larue05] A. Larue, Y. Altintas, *Simulation of flank milling processes*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, p. 549-559, 2005.
- [Lasri09] L. Lasri, M. Nouari, M. El Mansori, *Modelling of chip separation in machining unidirectional FRP composites by stiffness degradation concept*, *Composites Science and Technology*, vol. 69, p. 684-692, 2009.
- [Lauwers06] B. Lauwers, P.P. Lefebvre, *Five-axis rough milling strategies for complex shaped cavities based on morphing technology*, *Annals of the CIRP*, vol. 55, 2006.
- [Lee06] H.S. Lee, M.S. Park, M.T. Kim, C.N. Chu, *Systematic finishing of dies and molds*, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, p. 1027-1034, 2006.
- [Lin96] R.S. Lin, Y. Koren, *Efficient tool-path planning for machining free-form surface*, *Transactions of ASME*, vol. 118, p. 20-28, 1996.
- [Lin02] J.T. Lin, D. Bhattacharyya, V. Kecman, *Multiple regression and neural networks analyses in composites machining*, *Composites Science and Technology*, vol. 63, p. 539-548, 2002.
- [Lorencz06] J. Lorincz, *Composites Fly Lighter, Stronger – Tape laying and fiber placement systems automate composite structure production and reduce costs*, *Manufacturing Engineering*, vol. 136, 2006.
- [Marty10] D. Marty, F. Massé, E. Duc, *Usinage aéronautique : optimisation de l'ébauche et intégration de broches 100 kW*, *Intercut 2010 – 6<sup>ème</sup> Assises MUGV, Arts et Métiers Paristech Cluny, 13-15 Octobre 2010*.
- [Mahdi01] M. Mahdi, L. Zhang, *A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials*, *Journal of materials processing technology*, vol. 113, p. 373-377, 2001.
- [Marquez05] J.J. Marquez, J.M. Perez, J. Rios, A. Vizan, *Process modeling for robotic polishing*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, p. 69-82, 2005.
- [Mkaddem08] A. Mkaddem, I. Demirci, M. El Mansori, *A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites : cutting forces analysis*, *Composites science and technology*, vol.68, p. 3123-3127, 2008.
- [Mondelin10] Mondelin, B. Furet, J. Rech, *Characterisation of friction properties between a laminated carbon fibres reinforced polymer and a monocrystalline diamond under dry or lubricated conditions*, *Tribology International*, vol. 43, p.1665-1673, 2010.

- [Palanikumar06] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, *Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites*, *Materials and design*, vol. 27, p. 862-871, 2006.
- [Palanikumar07a] K. Palanikumar, J. Paulo Davim, *Mathematical model to predict tool wear on the machining of glass fibre reinforced plastic composites*, *Materials and design*, vol. 28, p. 2008-2014, 2007.
- [Palanikumar07b] K. Palanikumar, *Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastic using response surface methodology*, *Materials and design*, vol. 28, p. 2611-2618, 2007.
- [Palanikumar08] K. Palanikumar, F. Mata, J. Paulo Davim, *Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tools*, *Journal of materials processing technology*, vol. 204, p. 469-474, 2008.
- [Palardy08] G. Palardy, P. Hubert, M. Haider, L. Lessard, *Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish*, *Composites : Part B*, vol. 39, p. 1280-1286, 2008.
- [Paris04] H. Paris, G. Peigne, R. Mayer, *Surface Shape prediction in high speed milling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, p. 1567-1576, 2004.
- [Park03] S.C. Park, *Tool-path generation for Z-constant contour machining*, *Computer-Aided Design*, vol. 35, p. 27-36, 2003.
- [Pechard09] P.Y. Pechard, C. Tournier, C. Lartigue, J.P. Lugarini, *Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high speed flank milling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, p. 454-461, 2009.
- [Pessoles09] X. Pessoles, C. Tournier, *Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center*, *Journal of materials processing technology*, vol. 209, p. 3665-3673, 2009.
- [Petropoulos08] G. Petropoulos, F. Mata, J. Paulo Davim, *Statistical study of surface roughness in turning of peek composites*, *Materials and design*, vol. 29, p. 218-223, 2008.
- [Poulachon04] G. Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin, *Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels*, *Wear*, vol. 256, p. 302-310, 2004.
- [Preston27] F. Preston, *The theory and design of plate glass polishing machine*, *Journal of the Society of Glass Technology*, vol. 11, p. 214-256, 1927.

- [Quinsat08] Y. Quinsat, L. Sabourin, C. Lartigue, *Surface topography in ball end milling process : description of a 3D surface roughness parameter*, *Journal of materials processing technology*, vol. 195, p. 135-143, 2008.
- [Robert05] E. Robert, *Aéronautique : optimiser les rendements à tous les niveaux*, *Trametal*, p. 6-19, Juin 2005.
- [Rahman99] M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S Prakash, D.C.G Tan, *Machinability study of carbon fiber reinforced composite*, *Journal of materials processing technology*, vol. 89-90, p. 292-297, 1999.
- [Rao07a] G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar, *Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism*, *Composites science and technology*, vol. 67, p. 2271-2281, 2007.
- [Rao07b] G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar, *Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites-cutting forces analysis*, *Composites science and technology*, vol. 67, p. 579-593, 2006.
- [Rauch09] M. Rauch, E. Duc, J.Y. Hascoet, *Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraint modelling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, p. 375-383, 2009.
- [Rawat09] S. Rawat, H. Attia, *Characterisation of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 58, p. 105-108, 2009.
- [Reyne98] M. Reyne, *Technologie des composites (3ème édition)*, éditions Hermes, ISBN 2-86601-688-8, 1998.
- [Roswell06] A. Roswell, F. Xi, G. Liu, *Modelling and analysis of contact stress for automated polishing*, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 46, p. 424-435, 2006.
- [Sandik97] Sandvik Coromant, *Techniques modernes d'usinage : Guide pratique*, ISBN 91 972299 6 2, 1997.
- [Santiuste10] C. Santiuste, X. Soldani, M.H. Miguez, *Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components*, *Composite Structures*, vol. 92, p. 691-698, 2010.
- [Shanmugam08] D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang, *A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining*, *Composites : Part A*, vol. 39, p. 923-929, 2008.

- [Shiou08] F.J. Shiou, C.C. Hsu, *Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machine centre*, *Journal of materials processing technology*, vol. 205, p. 249-258, 2008.
- [Sonbaty04] I. El Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly, *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*, *Composite Structures*, vol. 63, p. 329-338, 2004.
- [Teti02] R. Teti, *Machining of composites materials*, University of Naples Federico II, 2002.
- [Toh05] C.K. Toh, *Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials*, *Materials and Design*, vol. 26, p. 517-533, 2005.
- [Tournier01] C. Tournier, *Contribution à la conception des formes complexes : la surface d'usinage en 5 axes*, Thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 2001.
- [Tournier05] C. Tournier, E. Duc, *Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling*, *International Journal of Advanced Technology*, vol. 25, p. 867-875, 2005.
- [Tsai06] M.J. Tsai, J.F. Huang, *Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, p. 817-827, 2006.
- [Uimm07] Union des Industries et des Métiers de la Métallurgie (UIMM), *Du métal au composite*, *Information des professionnels de l'industrie*, n° 1, 2007  
[http://www.aquitaine-industrie.com/uimm-iso/iso\\_album/metal\\_composite\\_1.pdf](http://www.aquitaine-industrie.com/uimm-iso/iso_album/metal_composite_1.pdf)
- [Vogler04] M.P. Vogler, R.E. Devor, S.G. Kapoor, *On the modelling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part 1 : surface generation*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, p. 685-694, 2004.
- [Wang03] X.M. Wang, L.C. Zhang, *An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics*, *International journal of machine tools and manufacture*, vol. 43, p. 1015-1022, 2003.
- [Wu07] X. Wu, Y. Kita, K. Ikoku, *New polishing technology of free form by GC.*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187, p. 81-84, 2007.
- [Yanming02] Q. Yanming, Y. Qixun, X. Lijing, *Study on the adaptability of thick film diamond tool to cutting composites*, *Journal of machine tools and manufacture*, vol. 42, p. 501-504, 2002.

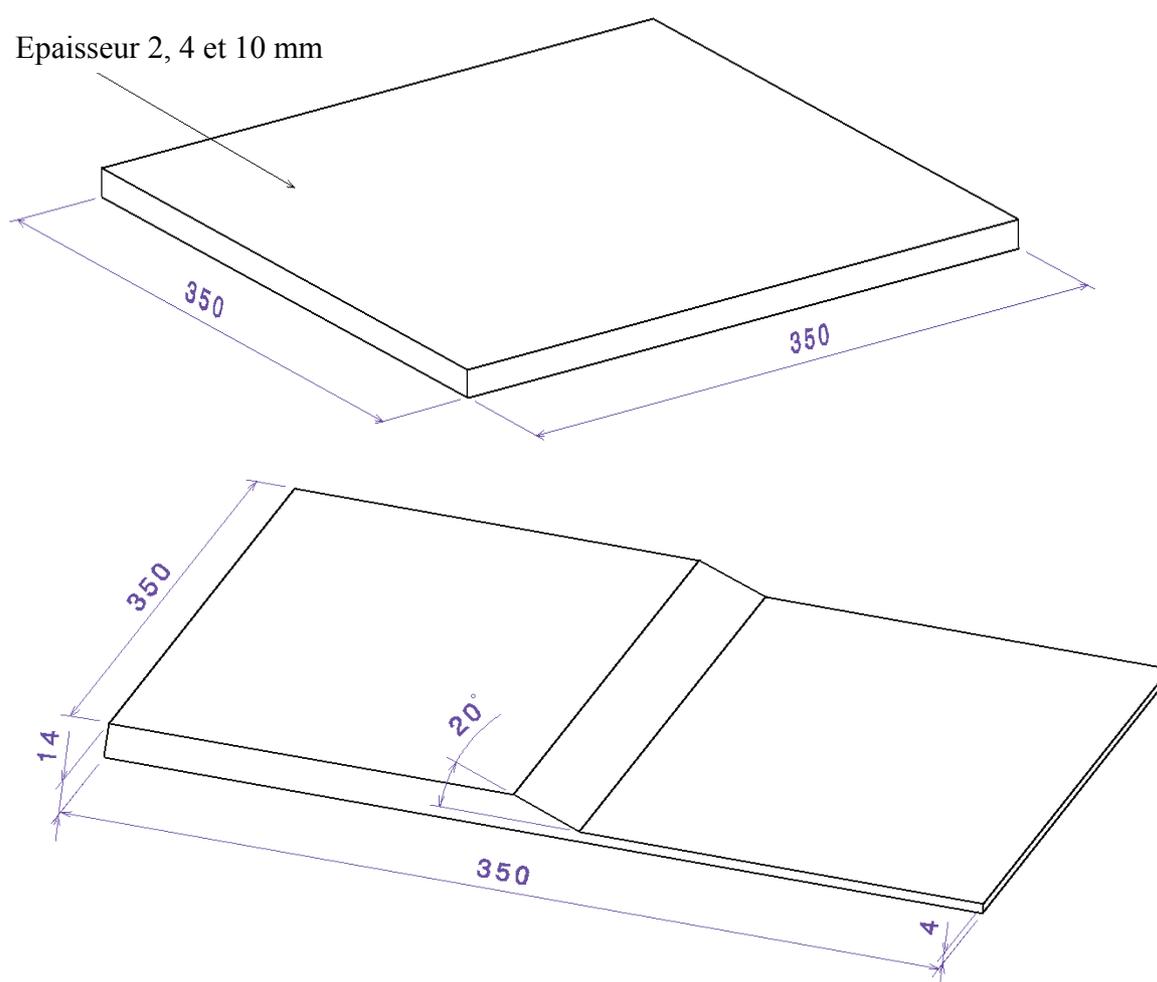
- [Yuan96] Z.J. Yuan, M. Zhou, S. Dong, *Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 62, p. 327-330, 1996.
- [Zhou02] X. Zhou, F. Xi, *Modeling and predicting surface roughness of the grinding process*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, p. 969-977, 2002.



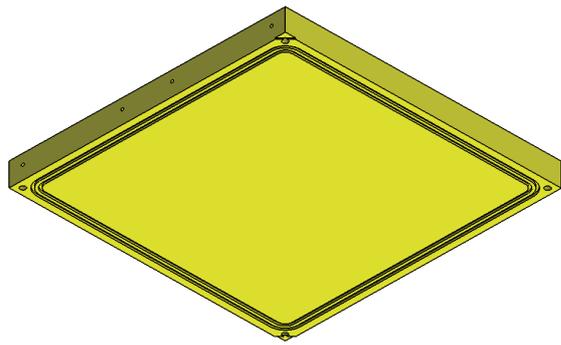
## Annexe

### Démonstrateur de laboratoire

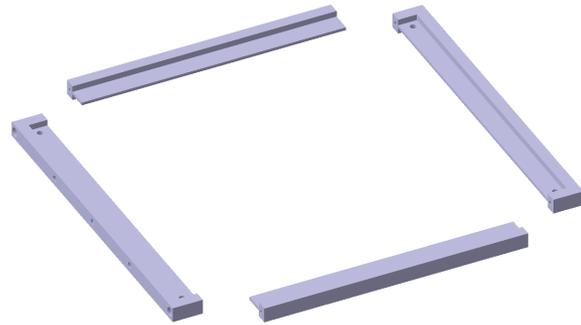
Le démonstrateur de laboratoire réalisé dans le cadre du projet FUI LCM-Smart est un outillage pour RTM permettant de réaliser des pièces en matériaux composites de différentes épaisseurs.



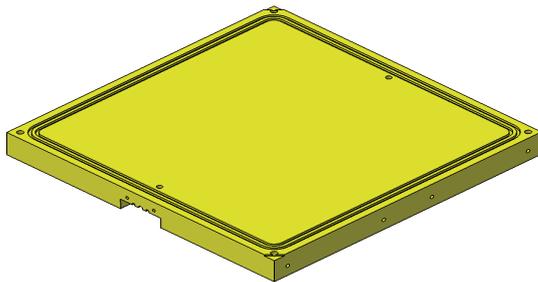
Pour réaliser cet outillage, une plaque inférieure et supérieure sont utilisées avec différents cadres permettant de donner l'épaisseur souhaitée à la pièce réalisée en RTM.



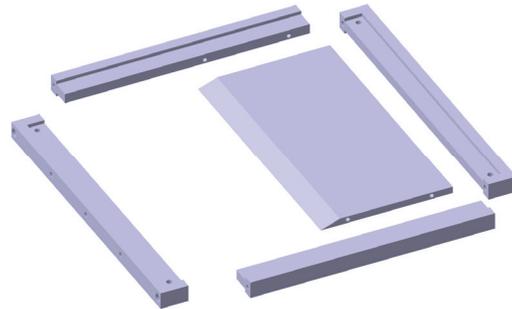
(a) plaque supérieure



(c) Cadre pour épaisseur constante

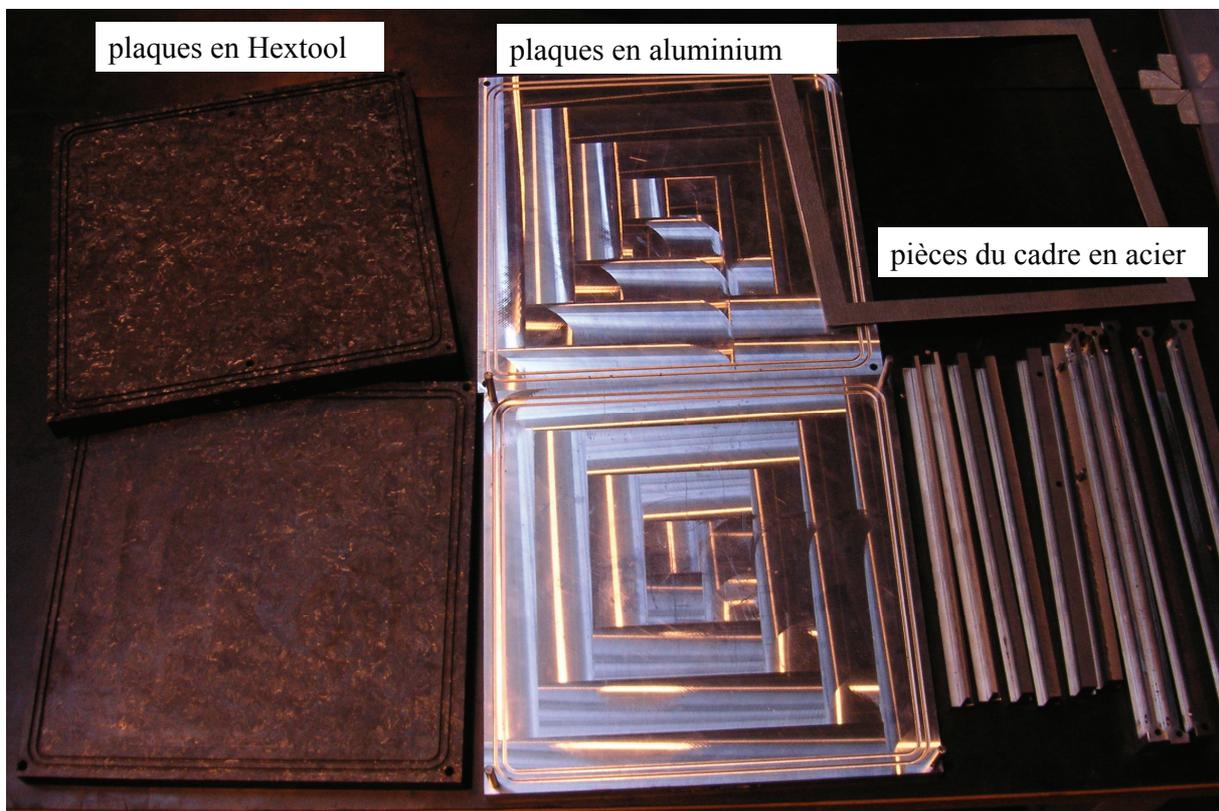


(b) plaque inférieure

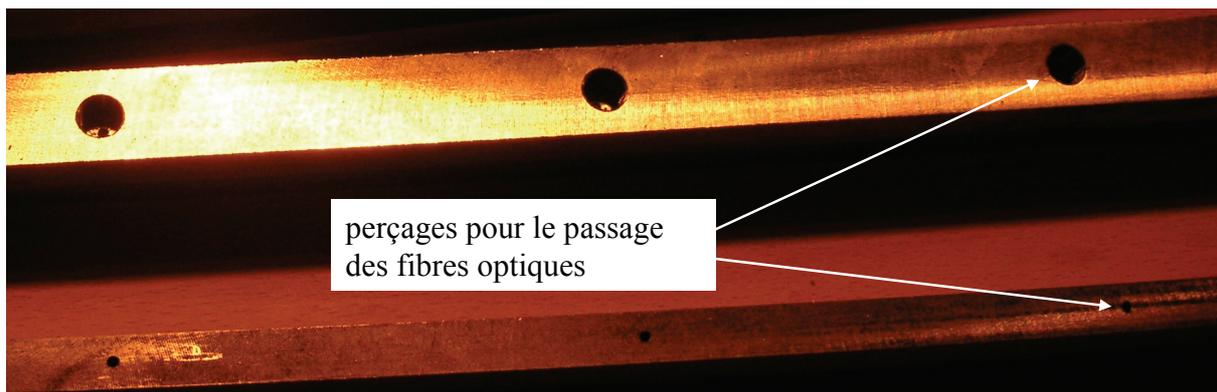
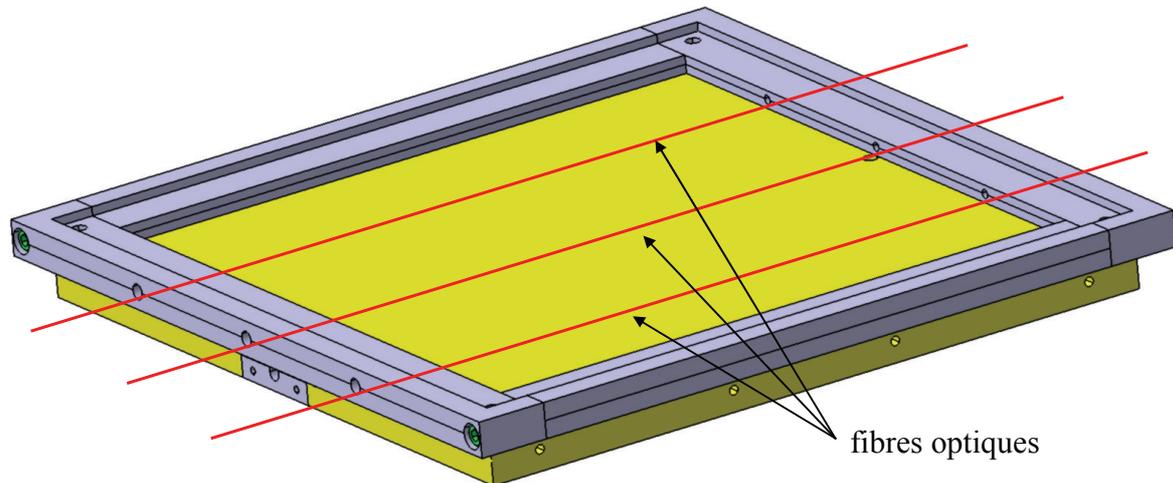


(d) Cadre pour épaisseur variable

Afin d'observer l'impact du matériau utilisé pour le moule sur le procédé RTM, un jeu de plaques inférieures et supérieures sont réalisées en alliage d'aluminium et en Hextool™. Les cadres en acier sont utilisés pour ces deux types d'outillage.



De plus, pour étudier l'injection de la résine dans le moule, trois fibres optiques traversent la pièce injectée de part en part. Pour pouvoir instrumenter la pièce de cette façon, des perçages en électroérosion sont réalisés dans le cadre en acier XC 38 de l'outillage pour le passage des fibres optiques.







## Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire se focalise sur l'usinage de moules en matériaux composites, en considérant les problèmes d'état de surface et de gamme d'usinage.

Les pièces de structure aéronautiques peuvent être obtenues par les procédés de fabrication de la famille LCM (Liquid Composite Molding). Ce procédé impose une température de fonctionnement élevée qui conduit à une dilatation du moule néfaste à la qualité de la pièce injectée. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de réaliser l'outillage dans un matériau à faible dilatation ou se comportant comme le matériau injecté. Pour cela, un matériau composite (Hextool™) est proposé en remplacement des moules métalliques conventionnels.

L'étape d'usinage de forme est indispensable car elle donne les dimensions finales de l'outillage et conditionne le temps de polissage manuel nécessaire pour atteindre la rugosité arithmétique visée. Ce travail propose deux voies d'amélioration à travers l'étude micro-géométrique de l'opération de finition par outil coupant puis par outil abrasif.

La première voie met en évidence l'existence d'une valeur minimale de rugosité accessible lors d'un usinage avec un outil coupant. L'analyse de ce phénomène permet de proposer une valeur de prise de passe radiale optimisant le ratio rugosité du moule / temps d'usinage. La deuxième conduit à la définition d'un outil abrasif utilisable sur un centre d'usinage. La faisabilité d'une telle opération et les capacités de cette technologie innovante sont discutées. Enfin, le choix des outils, des stratégies d'usinage et de la machine outil sont discutés et aboutissent à la proposition d'une gamme de référence pour l'usinage d'ébauche et de finition de moules en matériaux composites.

**Mots-clés :** usinage de matériaux composites, finition par outil coupant, finition par outil abrasif, moule, gamme d'usinage.

## Summary

Presented research works deal with the milling of mold in composites materials, considering surface roughness and plan of procedure.

Aeronautical structure parts could be produced by LCM (Liquid Composite Molding) processes. These processes induce high operating temperature for mold which is harmful for the dimensional quality of manufactured parts. In order to solve this problem, material with low heat elongation or with the same behavior as injected resin should be used for the mold. Thus, a composite material (Hextool™) is proposed to replace conventional metallic molds.

The milling operation produces the final dimensions of the tool and determines the time of manual polishing operation to reach the required arithmetic roughness. This work offers two ways of improvement through the study of micro-geometric surface finishing operation by cutting tool and then abrasive tool.

The first way highlights the appearance of a minimum reachable value of roughness during machining with a cutting tool. The analysis of this phenomenon ensures to give an optimal value of radial depth of cut. Indeed, in this case, the best ratio surface quality / machining time is achieved. The second ensures to define an abrasive tool usable on a CNC machine tool. The feasibility of this operation and capabilities of this innovative technology are discussed. Finally, the choice of tools, machining strategy and machine tool are discussed and lead to the proposal of a reference process planning for composite molds roughing and finishing.

**Keywords :** machining of composites materials, surface finishing with cutting tool, surface finishing with abrasive tool, process planning.